

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ и КАРТОГРАФИИ

На правах рукописи

Шишкин Игорь Петрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Специальность 05.11.07

«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

ДИССЕРТАЦИЯ

НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель:
доктор технических наук
профессор Соломатин В.А.

Москва 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Анализ принципов и схем построения минипроекторов.....	10
1.1 Аналитический обзор проекционных технологий.....	10
1.2 Анализ современных источников света минипроекторов.....	13
1.3 Оптические модуляторы. Принцип действия, технические параметры, технология изготовления.....	15
1.4 Классификация цифровых проекторов на основе применяемых проекционных технологий.....	20
1.5 Классификация минипроекторов по потребительским свойствам и техническим параметрам	26
1.6 Дисплеи со сканированием лазерного луча на основе двухмерной MEMS. Принцип действия, структурная схема, функциональные особенности и область применения ...	28
Выводы по главе 1.....	43
Глава 2. Разработка осветительных систем минипроекторов	44
2.1 Оптическая система минипроектора.....	44
2.2 Особенности построения осветительных систем минипроекторов	46
2.3 Анализ методов преобразования излучения лазерных диодов	49
2.4 Анализ вариантов конструкции преобразователей лазерного излучения, характеристики.....	50
2.5 Принципиальная схема формирователя лазерного излучения.....	52
2.6 Разработка системы с переменными выходными характеристиками для компенсации угла расходимости излучения лазера	53
2.7 Разработка системы - расширителя пучка с переменным увеличением.....	55
2.8 Методы миниатюризации осветительной системы.....	57
2.9 Элементы осветительной системы минипроектора.....	57
2.9.1 Расчёт линзы коллиматора для красного и синего лазера	57
2.9.2 Компактная схема коллиматора для зелёного лазера с функцией управления расходимостью пучка и его диаметра	61
2.9.3 Метод увеличения угла расходимости излучения лазера.....	62
2.9.4 Компактная оборачивающая система	64
2.10 Многофункциональные элементы.....	65
2.10.1 Расчёт коллиматора с призмой для двухволнового лазера	65
2.10.2 Блок коллиматоров – пример построения многофункциональных элементов осветительной системы.....	67

2.10.3 Генератор линии, его оптимальная конструкция	68
Выводы по главе 2.....	69
Глава 3. Объективы минипроекторов.....	70
3.1 Основные характеристики объективов современных минипроекторов.....	70
3.2 Методика расчёта объектива на основе типовой спецификации минипроектора ...	71
3.3 Исследование двухкомпонентного проекционного объектива с воздушным промежутком	73
3.4 Аберрационный анализ двухкомпонентного объектива	77
3.5 Исследование объектива с внутренней фокусировкой.....	80
3.6 Компактные объективы в развивающемся секторе мобильных устройств	87
3.6.1 Расчёт двухкомпонентного объектива и его конструктивные параметры.....	88
3.6.2 Объектив с дифракционным оптическим элементом и его основные характеристики	90
3.6.3 Апохроматический дублет	93
3.7 Светосильные объективы	94
3.7.1 Пятилинзовый объектив с высоким разрешением.....	95
3.7.2 Комбинированный объектив как способ объединения проекционного и осветительного трактов в минипроекторе.....	97
3.8 Объектив с офсетом. Простое решение для реализации сдвига оптической оси в минипроекторе.....	98
3.9 Пример реализации внутренней фокусировки в объективе минипроектора	100
3.10 Объектив с ультракоротким проекционным расстоянием для настольной проекции	102
3.11 Панорамный объектив как основа интерактивных систем визуализации объектов	107
3.11.1 Оригинальное решение фронтального зеркально-линзового блока	107
3.11.2 Панорамный телеконвертер для камеры мобильных устройств.....	110
3.12 Миниатюрный панкратический объектив с большим перепадом фокусных расстояний. Схема и конструктивные параметры.....	112
3.13 Методы коррекции дисторсии при сканировании	114
3.13.1 Динамическая коррекция с плавным изменением линейного увеличения изображения при сканировании.....	114
3.13.2 Статическая коррекция с помощью цилиндрического многолинзового растра	116
3.14 Оценка качества изображения объектива с помощью программных комплексов ZEMAX и CODE V	117

Выводы по главе 3.....	124
Глава 4. Оптические модули минипроекторов	125
4.1 Анализ конструкции оптического модуля и спецификации типового минипроектора	125
4.2 Конструкция миниатюрных оптических модулей.....	125
4.3 Конструкция оптических модулей с монолитными элементами.....	128
4.4 Конструкция оптического модуля с планарными элементами.....	132
4.5 Разработка конструкции оптических модулей с применением 3х-мерного проектирования.....	133
Выводы по главе 4.....	134
Заключение	135
Основные итоги диссертационной работы	135
Список сокращений и условных обозначений	136
Список литературы	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В настоящее время всё более широкое распространение получили различные мобильные устройства - портативные компьютеры, мобильные телефоны, цифровые фото- и видеокамеры, медиаплееры и минипроекторы.

Помимо того, что мобильные устройства становятся всё более миниатюрными, проявляется тенденция расширения их свойств, встраивания дополнительных функций, например, все современные мобильные телефоны имеют встроенную цифровую камеру.

Развивающийся сектор мобильных устройств нуждается в использовании как встроенных, так и подключаемых дополнительно проекционных устройствах, которые позволили бы расширить функциональные возможности портативных приборов.

Миниатюрные проекторы получили широкое распространение в последние годы. Эти проекторы весьма малы (помещаются на ладони) и в них используется светодиодная или лазерная подсветка.

Определились два новых направления развития портативных проекторов - автономные (standalone) также называемые карманные проекторы (pocket projectors) и встроенные (embedded) пикопроекторы.

Карманные проекторы могут быть подключены к портативному устройству (мобильный телефон) для проектирования изображения на любую плоскую поверхность,

тогда как пикопроекторы непосредственно встроены в корпус сотового телефона или мобильного устройства. Они меньше и легче автономных (карманных) проекторов.

Степень разработанности темы

В последние годы ряд фирм уже разработали конструкции минипроекторов, в которых используются различные принципы синтеза изображения, однако дальнейшее развитие миниатюрных источников света, таких как светодиоды и лазерные диоды, открывает всё новые возможности для создания более компактных цветных дисплеев и проекторов с высокой яркостью и разрешением изображения на экране.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы является решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в миниатюризации проекционных оптических систем, применяемых в современных мобильных устройствах, и увеличение их разрешающей способности, имеющей значение для развития оптической отрасли, связанной с разработкой портативных проекционных систем.

Задача и основная **идея** диссертационной работы заключаются в разработке теоретических аспектов и конструкторско-технологических решений, обеспечивающих миниатюризацию проекционных оптических систем, применяемых в современных мобильных устройствах.

На защиту выносятся следующие научные положения

1. Разработанные оптические схемы и методика расчёта осветительных систем минипроекторов позволяют решить задачи по преобразованию лазерного излучения в соответствии с исходными данными и существенно сократить размеры оптического модуля минипроектора.

2. Разработанные оптические схемы и методика расчёта объективов минипроекторов позволяют создать компактные объективы с требуемыми оптическими характеристиками (светосила, угловое поле, разрешение) и расширенными функциональными возможностями (офсет, внутренняя фокусировка, переменное увеличение).

3. Предлагаемая методика и инновационная конструкция оптических модулей минипроекторов обеспечивают их минимальные габариты и возможность интегрирования в современные портативные устройства (мобильный телефон, цифровую камеру, ноутбук).

Основные научные результаты исследования

1. Разработаны оригинальные принципы построения и методики расчета осветительных системы минипроекторов с применением методов преобразования излучения лазерных диодов, позволяющие минимизировать габариты и массу осветительных систем.

2. Разработаны принципиально новые оптические схемы и методики расчета:

- компактного, светосильного, комбинированного объективов;
- объектива с офсетом и внутренней фокусировкой;
- широкоугольного объектива с ультракоротким проекционным расстоянием;
- панорамного зеркально-линзового объектива;
- миниатюрного объектива с переменным фокусным расстоянием.

Предложенные решения позволяют повысить разрешающую способность проекционных систем и расширить их функциональные возможности (осуществление внутренней фокусировки, переменного увеличения и расширение углового поля).

3. Разработаны принципы построения и методики расчета многофункциональных, комбинированных, монолитных и планарных оптических элементов минипроекторов, теоретически обоснованы варианты конструкций оптических модулей минипроекторов, позволяющие добиться максимальной плотности компоновки оптических модулей.

Научная новизна работы

1. Разработаны принципиально новые осветительные системы минипроекторов, отличающиеся от аналогов компактностью конструкции (сокращено количество элементов, увеличена световая эффективность, уменьшены габариты, масса и себестоимость).

2. Предложена и теоретически обоснована схема двухкомпонентного проекционного объектива с воздушным промежутком, в котором впервые была определена область оптимальных значений кардинальных отрезков, и было показано, что в таком объективе может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических аберраций третьего порядка.

3. Выполнены теоретические исследования триплета, используемого для фокусировки изображения на экране, и впервые была выведена оригинальная формула соотношения оптических сил компонентов, позволяющая получить простое решение для реализации внутренней фокусировки в объективе. Показано, что при указанном соотношении оптических сил компонентов в объективе может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических аберраций третьего порядка.

4. Разработаны оригинальные оптические схемы объективов минипроекторов и оптические модули минипроекторов с использованием многофункциональных, комбинированных, монолитных и планарных оптических элементов, позволяющих существенно упростить конструкцию оптического модуля и сократить его размеры и стоимость.

Практическая значимость работы

1. На основе анализа современных проекционных технологий выработаны практические рекомендации по выбору оптимальных схем миниатюрных проекционных

систем в зависимости от установленных конструкторско-технологических факторов (типа и принципа работы оптического модулятора, типа выбранного источника света, размера и формата экрана, требуемой яркости и равномерности изображения, разрешающей способности объектива и т.д.).

2. Разработаны и внедрены принципиально новые осветительные системы минипроекторов, варианты конструкций оптических модулей минипроекторов, объективы, многофункциональные, комбинированные, монолитные и планарные оптические элементы с использованием разработанных методов преобразования лазерного излучения и методов миниатюризации.

3. Перечисленные разработки теоретически обоснованы, защищены 24 патентами, доведены до конкретных инженерных рекомендаций и внедрения в серийные образцы современной оптической проекционной техники и технологии.

Теоретическая значимость диссертации заключается в научном обосновании методов миниатюризации проекционных оптических систем высокого разрешения.

Апробация

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях:

1. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Samsung Optical Modulator (SOM) as the Light Modulator for Next Generation Display Applications. SAMSUNG Tech Conference 2006

2. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Design and Image Processing of Novel Diffractive Optical Modulator for Embedded Module Display Applications. Conference on Laser and Electro-Optics/Pacific Rim. OSA. (2007)

3. I.Shyshkin. Projection lens for embedded pico projector. SAMSUNG Tech Conference 2010

4. I.Shyshkin. Illumination optics for embedded pico projector. SAMSUNG Tech Conference 2010

Достоверность подтверждена результатами внедрения разработок автора в производство образцов миниатюрных проекторов в компании «Samsung Electro-Mechanics Co.».

Методы и методология исследования

1. Обзор печатных изданий и патентных баз.

2. Аналитические методы и алгоритмы, основанные на применении аппарата геометрической оптики.

3. Компьютерное моделирование оптических систем с использованием программных комплексов Zemax и Code V.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 статей, две из которых – в журнале, рекомендованном ВАК РФ, 4 статьи в журналах, представленных в базе данных Scopus, получено 24 патента на изобретения.

Личный вклад автора

Все исследования, проведённые по теме диссертации, принадлежат автору. Автором были разработаны оптические системы минипроекторов с использованием методов миниатюризации, методов преобразования излучения лазерных диодов, сделаны расчёты миниатюрных объективов, разработаны многофункциональные, комбинированные, монолитные и планарные оптические элементы. При непосредственном участии автора проводилась подготовка основных публикаций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём составляет 142 страницы, работа содержит 52 таблицы, 70 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цель и задачи, отображены научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, определены основные направления исследования.

В **первой главе** сделан аналитический обзор современных проекционных технологий, рассмотрены основные принципы построения проекционных систем. Приведены примеры оптических систем современных проекторов с описанием принципа работы и анализом оптических характеристик. На основе анализа физических принципов, применяемых в различных проекционных технологиях, была составлена классификация минипроекторов, отмечены их достоинства и недостатки и определены направления развития миниатюрных проекторов в будущем.

Вторая глава посвящена расчёту осветительных систем минипроекторов, методам преобразования лазерного излучения. В главе дано описание схемы преобразования излучения в осветительной системе лазерного проектора, выдвинута идея создания многофункциональных элементов и сформулированы методы миниатюризации.

Сделаны практические расчёты отдельных элементов осветительной системы и проведён анализ их качественных характеристик. Приведены примеры построения многофункциональных оптических элементов: коллиматор с призмой, блок коллиматоров, генератор линии.

В **третьей главе** дана классификация проекционных объективов. Проведены общие теоретические исследования двухкомпонентного проекционного объектива с воздушным

промежутком, в результате чего было получено характеристическое уравнение, определяющее область оптимальных значений кардинальных отрезков в объективе.

На основе абберационного анализа двухкомпонентного проекционного объектива было показано, что в объективе с оптимальным сочетанием величин кардинальных отрезков может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка.

Проведено теоретическое исследование триплета, в результате чего была выведена оригинальная формула соотношения оптических сил компонентов, позволяющая получить простое решение для реализации внутренней фокусировки в объективе. При анализе aberrаций третьего порядка в триплете было показано, что при таком сочетании оптических сил в объективе может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка.

Представлена разработка оригинальных оптических схем компактного, светосильного и комбинированного объективов, объектива с офсетом и внутренней фокусировкой, широкоугольного объектива с ультракоротким проекционным расстоянием, панорамного зеркально-линзового объектива, миниатюрного объектива с переменным фокусным расстоянием, описаны методы коррекции изображения при сканировании.

На примере расчёта 5-ти линзового светосильного объектива проведён анализ оптических характеристик, полученных при расчёте, и выполнен расчёт допусков.

Четвёртая глава посвящена разработке оптических модулей минипроекторов, рассмотрены различные конфигурации оптических модулей, приведены варианты конструкции.

В заключении подведены итоги выполненного исследования, даны рекомендации по использованию полученных результатов, намечены перспективы дальнейшей разработки темы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ И СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ МИНИПРОЕКТОРОВ

1.1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРОЕКЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Проекционные технологии в настоящее время развиваются особенно интенсивно, что связано со всеобъемлющим проникновением информационных технологий во все сферы жизнедеятельности современного человека.

Появление новых миниатюрных источников света с большой яркостью, оптических модуляторов с высоким разрешением и быстродействием, а также активное применение проекционной техники в мобильных устройствах требует поиска новых решений при создании проекционных систем.

Одним из многообещающих направлений развития современных дисплеев является и создание проекционных устройств для домашнего кинотеатра.

Минипроекторы, безусловно, представляют одно из наиболее перспективных направлений развития мобильных устройств.

Этому способствует удачная комбинация DLP-технологии и SSL-технологии твердотельных источников света (светодиодов LED или лазеров LD). Видеопроекторы на основе Texas Instruments (TI) DLP по-прежнему доминируют на рынке.

Светодиоды и лазерные диоды могут быть успешно использованы в качестве источников света, поскольку они имеют больший ресурс, чем лампы UHP, более быстрое время переключения, меньшее выделение тепла. Кроме того, для отдельной модуляции по цветам в проекторах с использованием ламп UHP обычно используются цветоразделительные фильтры - в DLP-проекторах это цветоразделительный механический диск, а в LCOS-проекторах - дихроичные цветоразделительные призмы. А это - лишняя цена, увеличение габаритов устройства и лишние потери света и энергии.

Сверхяркие светодиоды, бесспорно, являются лучшими источниками света для микродисплейных проекторов, благодаря таким преимуществам как простота управления, узкий спектральный диапазон излучения и, следовательно, высокая цветовая насыщенность и широкая палитра.

Совмещение технологии MEMS (на основе DLP) и технологии SSL с новыми источниками освещения (LEDs и LD) является новым, уникальным решением для достижения потенциально недорогих и компактных устройств и дальнейшего успешного развития рынка минипроекторов.

Преимущества и недостатки LCoS и DLP-проекторов наглядно иллюстрирует табл.1.1. Здесь же дана сравнительная характеристика минипроекторов в зависимости от типа используемых источников света [39].

Таблица 1.1

Технология	Преимущества	Недостатки
LCOS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Маленький размер пикселя ▪ Высокое разрешение ▪ Низкая цена ▪ Низкое потребление 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Сложная оптика ▪ Потери света
DLP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Патентная защита ▪ Высокий контраст ▪ Высокая эффективность 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Большой размер пикселя ▪ Высокая цена ▪ Большое потребление
LED	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Низкая цена ▪ Высокий контраст ▪ Высокая эффективность 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Большая расходимость ▪ неполяризованный свет
Laser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Малая расходимость ▪ Высокая яркость ▪ Поляризация 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Высокая цена ▪ Температурная нестабильность ▪ Проблема безопасности ▪ Спекл

В табл.1.2 приводится сравнительная характеристика лазерных проекторов в зависимости от типа оптического модулятора.

Таблица 1.2

Проектор	Тип модулятора	Сканер	Технология
Полноформатный	Микродисплей	-	LCoS, DLP
Растровый	Линейный	1D	GLV, SOM
Растровый	Лучевой	2D	Microvision, Fraunhofer

Как следует из приведённых ниже табл.1.3-1.4, многие компании-разработчики мобильных устройств по-прежнему стоят перед выбором - какой из источников света (светоизлучающие или лазерные диоды) наиболее приемлем? Решение этой задачи зависит от многих факторов – в том числе и от возможности успешной интеграции в конструкцию, эффективности, температурных условий, уровня яркости, необходимости подавления спекла для лазеров и конечной цены устройства.

Таблица 1.3

Параметр	Citizen Technology	Microvision	Texas Instrument	3M
Микродисплей	LCD	MEMS	DMD	LcoS
Источник света	LEDs (R,G,B)	Lasers (R,G,B)	LEDs (R,G,B)	LEDs (R,G,B)
Разрешение	800x600 (SVGA)	640x480 (VGA)	320x240 (QVGA)	640x480 (VGA)
Размеры	22 x 22 x 11 мм	20 x 40 x 7 мм	33 x 33 x 10 мм	-
Световой поток	10 лм	10 лм	8-10 лм	10 лм
Потребление	900 мВт	5 Вт	-	-

Таблица 1.4

Микродисплей	Разрешение	Световой поток	Мощность	Светоотдача
Scan	854 x 480	10 лм	5 Вт	2,0 лм/Вт
Syndiant	800 x 600	24 лм	4,3 Вт	5,6 лм/Вт
LcoS	640 x 480	15 лм	4 Вт	3,8 лм/Вт
DLP	848 x 480	19 лм	5 Вт	3,7 лм/Вт
LcoS	640 x 480	10 лм	4 Вт	2,5 лм/Вт
DLP	480 x 320	10 лм	4 Вт	2,5 лм/Вт

Такие компании как Microvision, Texas Instrument, 3M и Explay продолжают работать над развитием портативных минипроекторов, которые могут быть либо встроены в сотовые телефоны, либо могут быть автономными вспомогательными проекторами, способными проецировать изображения диагональю до 30 дюймов на стену, или просто на лист бумаги формата "A4" для просмотра объектов, поступающих непосредственно с мобильного телефона или компьютера.

Все эти компании используют различные технологии: Microvision использует лазерную технологию сканирования, в то время как Texas Instruments использует свою собственную технологию DLP, 3M использует LCoS технологию, а Explay использует гибридную схему на основе светодиодов и лазеров. Сочетание MEMS и SSL технологий требует новаторских

решений, введения комбинированных элементов в оптический модуль, управления механическими элементами и температурой, преобразования электрической мощности, электронные схемы привода, и в конечном итоге применения системного инженерного подхода к конструкции устройства и, в особенности, к конструкции оптического модуля.

Благодаря бурному развитию дисплейных технологий на основе микродисплеев с высоким разрешением появилась возможность создания миниатюрных проекционных устройств очень малых размеров. Такие минипроекторы могут быть легко встроены в современные мобильные устройства: сотовые телефоны, смартфоны, портативные компьютеры. Использование минипроекторов в составе мобильных устройств позволяет значительно расширить их функциональные возможности.

Несмотря на то, что размер изображения, создаваемый минипроектором, составляет не более 15 дюймов, а световой поток не превышает 20 лм, такие проекторы стали весьма востребованы на рынке.

Также как и традиционный проектор, минипроектор включает в себя миниатюрные источники света, оптические компоненты для преобразования и фокусировки излучения, оптические модуляторы и проекционный объектив. Отличительной особенностью минипроектора является автономное питание.

1.2 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА МИНИПРОЕКТОРОВ

Важными элементами минипроектора являются источники света, от выбора которых в немалой степени зависит оптимальная конфигурация разрабатываемого устройства, его выходные характеристики и габаритные размеры.

В табл.1.5 приведены типы миниатюрных источников света [39], применяемых в настоящее время в минипроекторах: светодиоды, лазерные диоды и комбинированные источники.

Как можно видеть из табл.1.5 у каждого типа источника света есть свои преимущества и недостатки.

Светодиоды имеют низкую цену и высокую надёжность, позволяют достичь малых размеров устройства, но при этом обладают высоким потреблением, низкой яркостью и требуют использование фокусирующей оптики.

Лазеры характеризуются высокой яркостью, малой расходимостью, низким потреблением и позволяют добиться высокого разрешения устройства, но в системах с использованием лазеров необходимо применять специальные элементы для подавления спекла, что приводит к увеличению габаритных размеров и росту цены.

Также нужно учитывать и требования по безопасности, что автоматически приводит к снижению яркости устройства.

Таблица 1.5

Источник	Преимущества	Недостатки
LED	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Отсутствие спеклов ▪ Маленькие размеры устройства ▪ Низкая цена ▪ Надёжность 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Необходимость фокусировки ▪ Высокое потребление ▪ Низкая яркость ▪ Нельзя применять с MEMS
Laser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Высокая яркость ▪ Высокое разрешение ▪ Малая расходимость ▪ Низкое потребление 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Спекл ▪ Проблема безопасности ▪ Высокая цена
Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Высокая яркость ▪ Высокая эффективность ▪ Низкая цена 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Нестандартное производство ▪ Большие размеры ▪ Сложная оптика ▪ Маленький ресурс

Гибридные источники, хотя и обладают высокой яркостью, высокой эффективностью и малой ценой, но при этом имеют большие размеры, малый ресурс, сложную оптику, что требует применения нестандартного оборудования при их производстве, а это, в свою очередь, увеличивает конечную цену устройства.

Таким образом, при выборе источников света для проектируемого устройства важно учитывать все эти факторы.



Рис. 1 Миниатюрный RGB модуль

На рис.1 показан пример миниатюрного светодиодного RGB модуля для минипроектора, серийно выпускаемого компанией Luminus.

1.3 ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

MEMS МОДУЛЯТОРЫ

На рис.1.1 показаны различные оптические модуляторы света описываемых ниже дисплейных MEMS технологий, а в табл.1.6 даны их преимущества и недостатки.

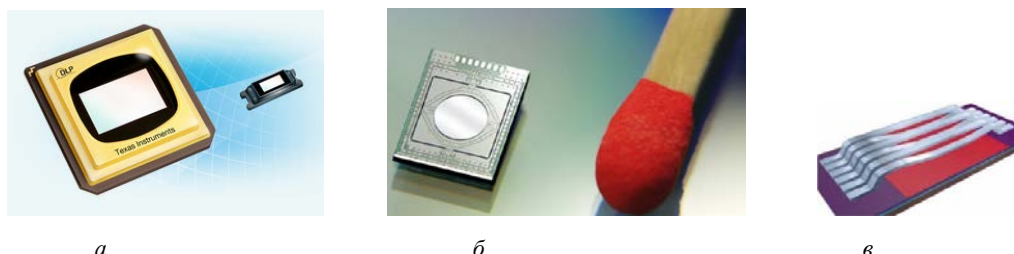


Рис. 1.1 ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ MEMS:

а – MEMS модулятор (Texas Instrument),
б – MEMS модулятор (Fraunhofer, Microvision) в – GLV модулятор (Kodak)

Таблица 1.6

Модулятор	Преимущества	Недостатки
MEMS Scan	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Маленькие размеры ▪ Простота управления 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Принцип сканирования ▪ Работает только с лазерами
DMD (DLP)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Высокий контраст ▪ Высокая яркость ▪ Большой формат изображения ▪ Работает со всеми источниками 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Высокая цена ▪ Паразитные эффекты
LCOS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Работает со всеми источниками ▪ Нет пикселизации изображения 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Низкое быстродействие ▪ Сложная технология ▪ Большие размеры ▪ Сложная оптика устройства

Пользуясь данными, приведёнными в табл.1.6, можно сравнить оптические модуляторы, которые в настоящее время применяются в современных мобильных устройствах.

Из всех представленных в таблице модуляторов MEMS Scan модулятор, в основу работы которого положен принцип сканирования, имеет наиболее простую схему управления и малые размеры, но главным недостатком является работа только с лазерными источниками света, что существенно ограничивает область применения такого модулятора. К тому же разрешение проектора с использованием этого модулятора будет определяться шириной лазерного пучка на экране.

DMD-модулятор, который работает по принципу качающихся микрзеркал, обеспечивает более высокий контраст и яркость изображения. А в связи с тем, что размер

пикселя в таком модуляторе составляет порядка 10-20 мкм, с ним можно получить высокое пространственное разрешение, а значит и значительно больший формат изображения на экране. Кроме того, этот модулятор может работать со всеми источниками света. Недостатками DMD-модулятора являются высокая цена и паразитные эффекты, для устранения которых необходимо применять дополнительные светопоглощающие оптические элементы.

LCOS-модулятор одинаково эффективно работает со всеми источниками света, но имеет сложную технологию изготовления и низкое быстродействие. Помимо этого, из-за сложности оптической системы модуль с LCOS микродисплеем имеет значительные габариты.

DMD МОДУЛЯТОР (DIGITAL MIRROR DEVICE) TEXAS INSTRUMENT

Идея формирования на поверхности кремниевой подложки массива электромеханических зеркал впервые обсуждалась ещё в начале 80х годов, но за серийное воплощение микрзеркальных модуляторов сумела взяться фирма Texas Instrument и в 1993 году был продемонстрирован опытный образец DMD-модулятора.

Модулятор на рис.1.1а представляет собой шарнирное устройство, на котором собственно и качается микрзеркало. Формирование элементов микромеханики и электродов управления осуществлено методом многостадийного напыления плёнок, фотолитографии и селективного травления. Микрзеркала имеют всего два состояния.

В одном состоянии свет от источника направляется в плоскость входного зрачка объектива, а затем попадает на поверхность экрана. В другом состоянии микрзеркала отправляют отражённый луч в светопоглотитель (light absorber).

MEMS КОМПОНЕНТЫ

В настоящее время наилучших результатов в области разработки и внедрения технологии MEMS достигнуты в институте фотоэлектронных микросистем Fraunhofer IPMS, где производятся различные компоненты для современных мобильных приложений: модуляторы света, одномерные и двумерные сканирующие зеркала.

Некоторые образцы MEMS (сканер) нашли применение и в серийных продуктах компании Microvision. На рис.1.2а показана микрзеркальная матрица для минипроекторов.

Основные параметры матрицы:

- разрешение 256 x 256 пикселей
- размер пикселя 16 μm x 16 μm
- частота 1кГц
- диапазон длин волн 193....1500 nm

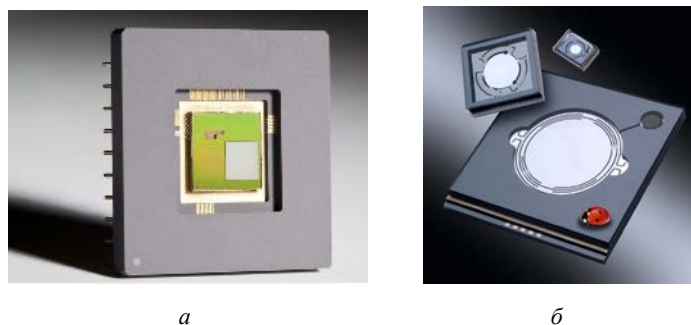


Рис. 1.2 MEMS КОМПОНЕНТЫ
a – микрозеркальная матрица (Fraunhofer), *б* – MEMS сканер (Microvision)

Одномерный MEMS модулятор

Институт Фраунгофера также производит разнообразные типы модуляторов света на основе микрозеркал (MOEMS). Среди них одномерный (1D) модулятор является одним из наиболее универсальных.

Такое устройство может применяться в широком диапазоне приложений: в лазерной проекции (Laser Direct Imaging), в полиграфии (Computer-to-Plate), в голографии, при маркировке материалов, обработке и защите интеллектуальной собственности.

Одномерный модулятор состоит из нескольких тысяч пикселей, выстроенных в ряд и отклоняющихся аналогично. Каждый пиксель может переключаться из тёмного положения в светлое с очень высокой скоростью. Благодаря малой массе и минимальному моменту инерции микрозеркал, модулятор имеет большую скорость развертки.

Для увеличения эффективности отражения света микрозеркала имеют оптическое покрытие. Размер пикселя составляет 10 μm .

Эта концепция позволяет получить изображение протяжённой линии с равномерным распределением света на экране.

Основные параметры модулятора:

- разрешение до 8000 пикселей
- частота 1 МГц (в перспективе до 1,6 МГц)
- видимый диапазон длин волн (в перспективе ближний инфракрасный).

Уровень технологии, разработанной в институте Фраунгофера можно оценить на примере матрицы с 1 млн. пикселей, сформированных на площади всего $33 \times 8 \text{ мм}^2$.

Эта матрица работает на частоте 2 кГц, с возможностью независимого отклонения микрозеркал. Конфигурация устройства и его размер могут быть адаптированы к потребностям заказчика. Микрозеркала изготавливаются с шагом $> 10 \mu\text{m}$ с использованием тонкопленочной технологии.

MEMS модулятор для проекционного модуля IPM фирмы MICROVISION

На рис.1.6 ниже показана базовая схема пикопроектора (PicoP), разработанного компанией Microvision Inc. Его конструкция довольно проста: красный, зеленый и синий лазеры, каждый из которых имеет на выходе коллиматорную линзу, которая собирает свет и обеспечивает малую числовую апертуру пучка на выходе. Затем свет от трех лазеров с помощью дихроичных зеркал объединяется в пучок белого света. С помощью светоделительного кубика или светоделительного зеркала пучок падает на двухосное сканирующее зеркало MEMS, которое проецирует изображение на экран.

Проецируемое изображение создается путем модуляции трех лазеров синхронно с позицией сканируемого луча. Конструкция проектора, известная также как Integrated Photonics Module (IPM), составляет всего 7 мм в высоту и менее чем в 5 куб. см в объеме.

Преимущество проектора состоит в том, что в его конструкции используется минимальное количество оптических элементов. Все три лазера управляются одновременно при создании естественной цветовой гаммы для каждого пикселя.

Всё это позволяет получить яркое изображение с широкой цветовой гаммой с использованием серийных RGB лазеров. Прямое управление лазерным пучком повышает эффективность устройства и обеспечивает высокий контраст изображения.

В сравнении с другими модуляторами SLM (spatial light modulator) световые потери в проекторе со сканированием лазерного пучка сведены к минимуму, поскольку в нём нет необходимости в отклонении или поглощении избыточного (паразитного) света. Сканирование лазерным пучком также обеспечивает высокое разрешение и отсутствие пикселизации изображения на экране.

Однако, наряду с простотой оптико-механического модуля, блок электроники становится более сложным.

В проекторе со сканированием лазерного луча нет необходимости в проекционном объективе, поскольку изображение на экране формируется с помощью сканера MEMS. При сканировании размер пикселей на краю экрана увеличивается и этот эффект является одним из недостатков проектора, но при этом изображение пикселей остаётся достаточно резким.

В отличие от бизнес-проекторов, в которых обычно применяются три модулятора SLM (по одному на каждый цвет), в этом проекторе нужен только один модулятор, что позволяет сократить размеры и тем самым улучшить очень важный параметр современных мобильных устройств – форм-фактор. В качестве источника света в этих системах могут использоваться лазеры или светодиоды.

Компания Microvision Inc., как разработчик миниатюрных проекционных дисплеев и систем захвата изображений в мобильных устройствах подготовила к выпуску новое

усовершенствованное ударопрочное сканирующее зеркало на платформе микроэлектромеханической (MEMS) системы с применением широкоугольного WVGA стандарта, имеющего разрешение 800×480 пикселей. Это приспособление является частью разрабатываемой компанией проекта PicoP по созданию ультра-миниатюрного дисплейного механизма (рис.1.3).

Тестирование новой системы проведено на базе крупного немецкого исследовательского центра Fraunhofer IPMS, одного из передовых институтов в области разработки MEMS.

Микроэлектромеханическое сканирующее зеркало – один из ключевых компонентов разрабатываемого компанией Microvision дисплейного механизма PicoP. Тончайшее зеркало по площади не превышает одного квадратного миллиметра и сравнимо по размерам с пишущей поверхностью заточенного простого карандаша. Это устройство предназначено для сканирования в горизонтальном и в вертикальном направлениях: каждый попадающий на него луч света прецизионно переводится в растровый формат, а весь процесс происходит с очень высокой скоростью, что позволяет составить полное видео изображение.

Новое микроэлектромеханическое сканирующее зеркало представляет собой полупроводниковое устройство, в центре которого находится крошечное зеркало.

К неотъемлемым преимуществам представленной архитектуры стоит отнести также низкий коэффициент кривизны и низкую энергозатратность, в сочетании с высоким качеством получаемых изображений.



Рис. 1.3 УЛЬТРА-МИНИАТЮРНЫЙ MEMS СКАНЕР

Система PicoP работает с коллимированным светом, что позволяет достичь высокой эффективности цветопередачи, высокого разрешения и высокой контрастности изображений. При этом в устройство PicoP не входят проекционные линзы, позволяя работать в фокусе на любом расстоянии от объекта, что является еще одним неоспоримым преимуществом новой микроэлектромеханической оптической системы.

GLV МОДУЛЯТОР (GRATING LIGHT VALVE)

В качестве MEMS модулятора используется также и дифракционный решетчатый световой затвор (Grating Light Valve – GLV), разработанный компанией Kodak по технологии (Grating Electro-Mechanical System – GEMS).

В отличие от модуляторов света с управляемыми зеркалами (Digital Micromirror Device – DMD), это не двумерный модулятор, а одномерная (liner array) дифракционная решётка, но также как и DMD представляет собой управляемый электромеханический модулятор (рис.1.1б).

Главное достоинство технологии GLV заключается в том, что кристалл модулятора обеспечивает достаточно высокое разрешение при низкой себестоимости. Например, изображение 1920×1080 пикселей может быть получено при сканировании 1080-пиксельной GLV-линейки. Если использовать технологию DMD, то в кристалле должно быть задействовано около 2 млн. элементов – микрозеркальных модуляторов. Другое достоинство GLV-технологии – высокая, фактически без зазоров, плотность расположения элементов, что обеспечивает высокий коэффициент модуляции.

1.4 КЛАССИФИКАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ПРОЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Значительную роль в классификации проекторов играет используемая технология.

Гистограмма [58] на рис.1.4 наглядно иллюстрирует развитие проекционных технологий и вклад различных технологий в общий рынок продаж за последние годы.

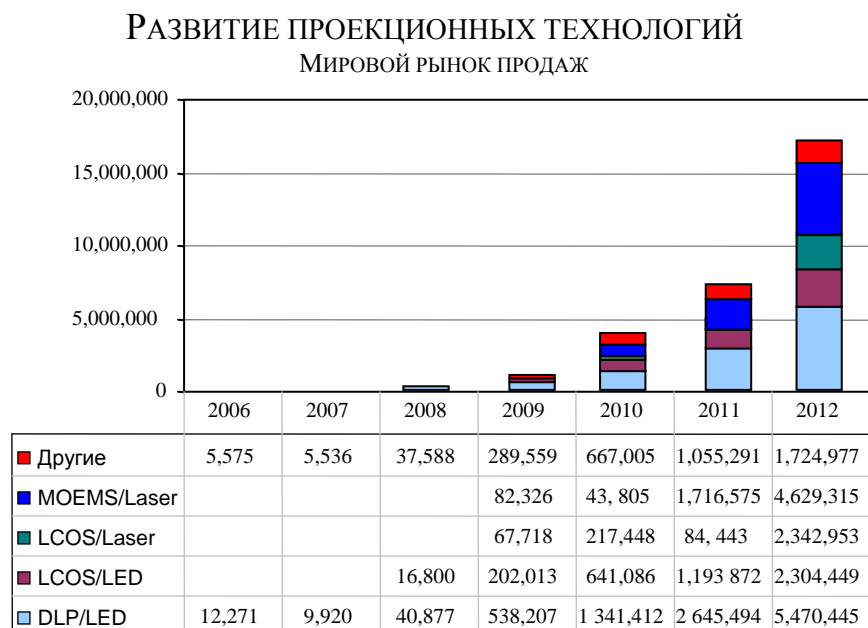


Рис. 1.4 РАЗВИТИЕ ПРОЕКЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время наиболее актуальны следующие проекционные технологии:

LCD. В жидкокристаллических проекторах изображение строится за счет того, что при подаче статического напряжения поляризация жидких кристаллов пикселя меняется, значительно снижая светопропускание.

DLP. В технологии DLP, разработанной компанией Texas Instruments, матрица представляет собой отражающую поверхность, покрытую микроскопическими зеркалами. Управляющее напряжение заставляет зеркала поворачиваться, соответственно меняя количество света, отраженного в объектив.

LCOS. Самая молодая из технологий. Подобно LCD, использует жидкие кристаллы, но является отражательной, а не просветной, что позволяет расположить большее число пикселей на единице поверхности, по сравнению с LCD, и это обеспечивает более высокое качество изображения. По типу используемых источников света цифровые проекторы делятся на ламповые и светодиодные.

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОЕКТОРЫ

По типу построения изображения проекторы могут быть однопанельными (цветное изображение строится на одной матрице, а для синтеза полноцветного изображения используется цветовой круг, состоящий из светофильтров) или трехпанельными, где каждый цветовой компонент светового пучка проецируется с помощью отдельной матрицы. Как правило, такое решение обеспечивает более естественную цветопередачу.

Впервые проектор с просветной ЖК-панелью был выпущен японской фирмой Sharp 15 лет назад. Он назывался SharpVision XV-100, содержал одну большую ЖК-панель с фильтрами RGB и проецировал на экран размерами 2×1,5 м. Как известно, ЖК-пиксель представляет собой сэндвич из скрещенных поляризаторов с полевым транзистором и конденсатором с прозрачными обкладками, заполненными жидкокристаллической средой.

Прозрачность пикселя зависит от управляющего напряжения. В обесточенном состоянии ЖК-панель прозрачна, с ростом управляющего напряжения сдвиг поляризации, вносимый жидкими кристаллами, и прозрачность пикселя уменьшаются до нуля.

Основной проблемой, которая стояла при создании и совершенствовании ЖК-проекторов, была и остается инерционность жидкокристаллических пикселей, оцениваемая постоянной времени или временем отклика, складывающимся из времени нарастания и времени спада. В ЖК-панелях почти всех проекторов до сих пор используются холестерические жидкие кристаллы типа TN (Twisted Nematic).

LCOS (англ. Liquid Crystal on Silicon — жидкие кристаллы на полупроводнике) — технология получения изображения, используемая в проекторах. Является третьей по

распространенности после технологий DLP и LCD, но занимает значительно меньшую долю рынка.

Синонимами LCoS являются фирменные аббревиатуры D-ILA (англ. Direct Drive Image Light Amplifier) компании JVC и SXRD (англ. Silicon X-tal Reflective Display) компании Sony.

Принцип работы современного LCoS-проектора близок к LCD, но, в отличие от последней технологии, использует не просветные ЖК-матрицы, а отражающие (этим LCoS родственна уже DLP-технологии).

На полупроводниковой подложке LCoS-кристалла расположен отражающий слой, поверх которого находятся жидкокристаллическая матрица и поляризатор. Под воздействием электрических сигналов жидкие кристаллы либо закрывают отражающую поверхность, либо открываются, позволяя свету от внешнего направленного источника отражаться от зеркальной подложки кристалла.

Как и в LCD-проекторах, в LCoS-проекторах сегодня применяются только трёхчиповые схемы на основе монохромных LCoS-матриц. Как и в технологии LCD, для формирования цветного изображения используются три кристалла LCoS, призма, дихроичные зеркала и светофильтры красного, синего и зелёного цветов.

В конце 1990-х годов, на заре развития технологии, компания JVC предлагала одночиповые решения на основе цветных матриц LCoS. В них световой поток разбивался на RGB-составляющие непосредственно в самой матрице при помощи фильтра HCF (Hologram Color Filter — голографический цветовой фильтр). Эта технология получила название SD-ILA (англ. Single D-ILA). Также одноматричные решения разрабатывались и компанией Philips.

Но одночиповые LCoS-проекторы не получили широкого распространения из-за ряда недостатков: трехкратных потерь светового потока при прохождении фильтра (что в том числе накладывало ограничения по причине перегрева матрицы), невысокого качества цветопередачи, более сложной технологии производства цветных LCoS-чипов.

МИКРОЗЕРКАЛЬНЫЕ DLP-ПРОЕКТОРЫ

Пионером в разработке микрозеркальных проекторов является компания Texas Instruments. Стимулом для проведения работ по созданию принципиально нового модулятора света послужил немалый опыт компании в области обработки светового сигнала в приборах ночного видения.

В результате появилось устройство под названием DMD - Deformable Mirror Device, - известное также как DLP-чип.

В основе конструкции DMD лежит принципиально новая дискретная структура отражающей матрицы, где каждый пиксель представляет собой отдельное поворачивающееся зеркало, занимающее два крайних устойчивых положения. Благодаря такому решению появился термин «цифровой» в названии устройства и технологии DMD.

Через десять лет был запущен в производство первый коммерческий DLP-проектор ультра малых размеров, за разработку которого компания получила специальный приз EMMY (DLP Cinema).

С 2004 года продукты на основе DLP-технологии получили широкое распространение по всему миру и стали применяться во многих областях промышленности, включая нетрадиционные: автомобилестроение, робототехника и др. А немногим позже, в 2009 году, была запатентована новая технология для производства пикопроекторов (DLP Pico TM).

В настоящее время более 120.000 кинотеатров по всему миру оснащено DLP-проекторами. В 2015 году был создан DLP-чип для нашиваемых (HUD) дисплеев.

Преимуществами DMD-технологии являются:

- высокий контраст;
- повышенная оптическая эффективность;
- высокое разрешение;
- малые размеры.

В частности, микрозеркала имеют размеры 16×16 мкм, их количество зависит от разрешения проектора. Микрозеркала крепятся на подложке DMD с помощью механических подпружиненных подвесов, которые заставляют их поворачиваться и занимать крайние положения. При одном положении микрозеркала отражённый свет попадает в проекционный объектив, а при другом - на поглощающий фильтр.

Что касается общих размеров массива зеркал матрицы, то их удалось уменьшить за счёт сокращения зазоров между микрозеркалами до 0,8 мкм, что позволило повысить контраст изображения примерно на 18% .

Не так давно Texas Instruments запустила в производство и новые модели матриц, в которых размер пикселя и зеркала составляет порядка 13 мкм, и теперь матрица с диагональю 0,7 дюйма имеет разрешение 1024×768 точек.

В планах компании начать серийное производство матриц размером 0,9 и 1,1 дюйма для проекторов с большим форматом экрана.

В процессе работы по усовершенствованию DLP-чипа было обращено особое внимание на оптимизацию геометрии отражающих элементов и топологии управляющих элементов матрицы.

За счёт оптимизации увеличилась яркость формируемого изображения на 5%, а контраст вырос на 20%. В частности была изменена форма держателя, представляющего собой в сечении восьмиугольник, а также уменьшена его площадь: сейчас восьмиугольная форма элемента вписывается в квадрат со стороной 2 мкм.

Наряду со значительным уменьшением габаритов (примерно в 2 раза) удалось сократить время загрузки команд в ячейки матрицы (более чем в 4 раза). Для этого был разработан новый алгоритм разбивки матрицы на блоки с параллельной загрузкой, что также способствовало повышению качества изображения.

Каждый пиксель содержит управляющий и пару адресных входов. Комбинация управляющего и адресного напряжений отклоняет зеркало к одному из крайних положений, соответствующих состояниям «включено» и «выключено». Время оптического переключения состояний микрозеркал не превышает 2 мкс, а управление их положением осуществляется широтно-импульсной модуляцией.

Совершенные DLP-проекторы содержат DMD-чипы в каждом канале первичных цветов RGB, и уровень цветовых составляющих светового потока по каждому пикселю определяется относительным временем нахождения зеркала во включенном положении на интервалах каждого поля. Его длительность подвергается 10-разрядной дискретизации, обеспечивающей 1024 уровня светового потока по каждому пикселю в каналах первичных цветов. Остальное базируется на способности зрения усреднять мгновенные яркости и цветовые оттенки всех пикселей экранного изображения. Для того, чтобы это получалось лучше, применяется увеличение частоты коммутации пикселей путем преобразования длинных импульсов включения пикселей в совокупность более коротких той же общей продолжительности в пределах каждого поля.

Подавляющее большинство DLP-проекторов реализовано по одночиповой технологии, т.е. содержат стеклянный вращающийся RGB-светофильтр, разделенный на 3, 4 (1 белый) или 6 секторов. Очевидно, в этом случае глазам приходится делать, кроме высокочастотного усреднения яркости, низкочастотное усреднение цветности, так как изображение на всем экране появляется последовательно в первичных цветах.

С ранее применяемым светофильтром, содержащим три цветных сектора, частота смены цветов составляет 150 Гц (180 Гц для системы NTSC), что недостаточно для исключения зрительных артефактов.

К ним относится, например, эффект «радуги», заключающийся в том, что зритель видит вместо однотонного цвета вспышки первичных цветов, особенно если быстро переводит взгляд по диагонали с одного фрагмента изображения на другой.

Замечено также, что усталость зрения при длительных просмотрах и субъективность восприятия цветовой палитры изображения в целом здесь больше, чем для трехчиповых проекторов DLP или других технологий. Поэтому работы по созданию новых вращающихся фильтров продолжаются. К ним относятся спиральные, с удвоенной частотой вращения, с семью секторами.

Большая световая эффективность DMD-матриц по сравнению с LCD связана с тем, что формирующие изображение элементы работают на отражение и поглощают меньше света, а площадь кристалла в них используется более эффективно. В LCD-матрицах около 50% площади изображения занимают элементы схемы управления, расположенные между пикселями, и полезная часть светового потока при этом блокируется.

В DMD-матрицах потери световой эффективности составляют всего 15%, а в последних моделях матриц – около 10%.

В результате достигается более высокое качество проецируемого изображения, а границы изображения становятся более четкими.

Сейчас в DLP-проекторах высокого разрешения применяется всего одна матрица, в то время как LCD-проекторах для формирования изображения используется три матрицы и для каждой матрицы требуется отдельный оптический блок.

В DLP-проекторах проблема теплоотвода решена путём направления неиспользуемой части светового потока на специальный поглотитель, который преобразует энергию света в тепло, что позволяет значительно упростить конструкцию проектора по сравнению с LCD-проекторами, в которых тепло отводится непосредственно от матрицы.

Это обстоятельство делает конструкцию проекторов, построенных по DLP-технологии, значительно легче и дешевле по сравнению с другими типами проекторов.

Инженеры компании Texas Instruments добились значительного прогресса в усовершенствовании DLP-технологии.

В DLP-проекторах обычно используется трехцветный вращающийся светофильтр. После того как был введён дополнительный прозрачный сектор, яркость изображения повысилась на треть, причём преобладающим стал белый цвет.

Известно, что эффективное время формирования изображения снижается из-за того, что падающий на светофильтр световой поток теряется, когда проходит через его границы и при этом матрица не формирует изображение.

При разработке новых моделей проекторов был учтён этот недостаток и найдена возможность сбалансировать вращение светофильтра с работой матрицы таким образом, чтобы избежать этих потерь.

В результате предпринятых инженерами усилий удалось увеличить яркость и контраст изображения в DLP-проекторах почти в 2 раза, что стало существенным достижением в развитии проекционных технологий.

1.5 КЛАССИФИКАЦИЯ МИНИПРОЕКТОРОВ ПО ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМ СВОЙСТВАМ И ТЕХНИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ

Сегодня одним из ключевых направлений для использования микродисплеев с высоким разрешением (свыше 800×600 пикселей) стали минипроекторы для мобильной аппаратуры (сотовых телефонов, PDA, iPod), так называемые пикопроекторы. Пикопроектор имеет достаточно малые размеры для интеграции в мобильные устройства, например в сотовый телефон.

Гистограмма [58] на рис.1.5 показывает стремительный рост продаж пикопроекторов в мире. Начиная с 2008 года, все существующие сегменты рынка минипроекторов уверенно растут. Прогнозируется, что рынок пикопроекторов к 2012 году должен достигнуть объема 15 млн штук/год.

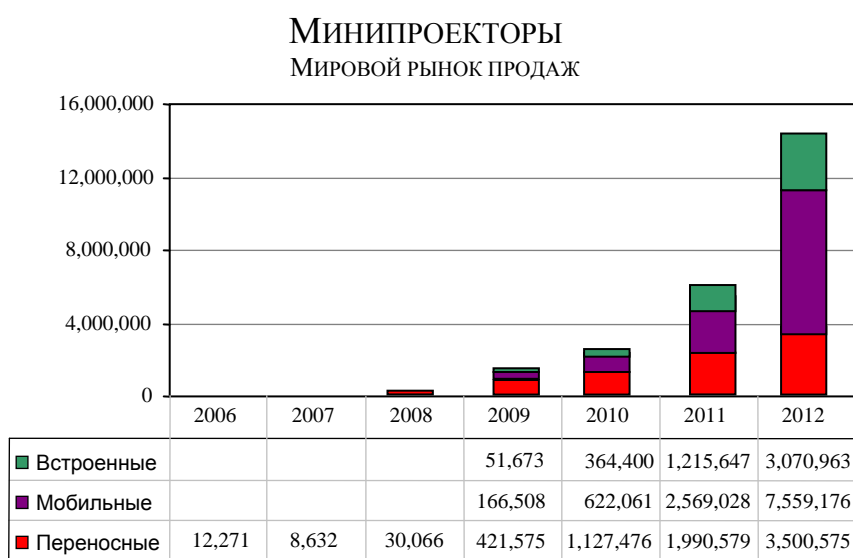


Рис. 1.5 РЫНОК МИНИПРОЕКТОРОВ

В автономных проекторах очень важно иметь большую выходную оптическую мощность. Кроме этого такие проекторы имеют свой источник питания и обладают интерфейсом с основным устройством.

Для встроенных проекторов главным критерием является потребляемая мощность и малые габариты. Встроенные пикопроекторы имеют световую эффективность 6 лм/Вт, а световой поток - до 110 лм.

В настоящее время рынок минипроекторов может быть условно поделён на 6 сегментов согласно таблице 1.7 ниже.

Таблица 1.7

Сегмент рынка	Класс	Технические параметры	Отличительные особенности
Игры	Пико	<5лм, VGA	минимальная цена, низкое качество
Смартфон	Пико	<15лм, <1,5Вт	для встраивания в мобильный телефон
Цифровая камера	Пико	<15лм, <1,5Вт, VGA>	для встраивания в камеру
Пикопроектор	Пико	<25лм, <5Вт	отдельное карманное устройство
Микропроектор	Микро	>25лм, >5Вт, WVGA>	для рабочих совещаний
Презентации	Микро	>50лм, >5Вт, SVGA>	для бизнес презентаций

В приведённой компанией Insight Media таблице, пикопроекторы (минипроекторы), прежде всего, классифицируются по сегментам рынка (потребительским параметрам):

- игровые
- встроенные в мобильные телефоны и смартфоны
- встроенные в цифровые камеры и видеокамеры
- переносные
- стационарные
- для презентаций

Как следует из таблицы, в классификации пикопроекторов существенную роль играют технические и экономические параметры:

- размеры
- световой поток

- мощность
- разрешение
- цена

Задачи, решаемые при проектировании пикопроекторов:

- выбор эффективных источников света
- эффективное объединение пучков света
- согласование рабочих апертур с поляризатором и модулятором
- максимальная технологичность и минимальная цена

1.6 ДИСПЛЕИ СО СКАНИРОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА ОСНОВЕ ДВУХМЕРНОЙ MEMS. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, СТРУКТУРНАЯ СХЕМА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Совместное использование лазерных источников света и MEMS технологии позволяет создавать такие системы отображения, как ультра малые проекторы для мобильных устройств, нашлемные дисплеи для автомобилей, переносные дисплеи и проекционные системы для 3D визуализации [37, 72].

Изображение создаётся одним двумерным MEMS при сканировании красным, зеленым и синим лазерами по горизонтали и вертикали. Благодаря отличному качеству пучка лазерного излучения, конструкция оптики в таких дисплеях весьма эффективна и компактна. Кроме того, лазерная подсветка позволяет отображать насыщенные цвета, которые желательны для приложений, где используется отображение виртуальной реальности.

С помощью этой технологии, был разработан самый маленький проектор для массового производства. Этот проектор имеет модуль высотой 7 мм и объемом 5 см³. Разрешение проектора – WVGA. Благодаря бесконечной глубине фокуса в таком проекторе не требуется никакой дополнительной проекционной оптики.

В отличие от проекторов на основе микродисплеев увеличение разрешения не приводит к увеличению размеров или снижению эффективности. Поэтому будущие проекторы на основе MEMS технологии в сочетании с высоким разрешением могут быть еще меньше и тоньше, компактнее и эффективнее и иметь более низкое энергопотребление.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Сканирующие лазерные дисплеи используются в нашлемных дисплеях благодаря их высокой яркости и контрасту. А недавно MEMS технология, в которой используется сканирование лазерным лучом по двум осям, стала применяться для нового класса персональных проекторов, называемых "пикопроекторы". Прогнозируется, что поставки встроенных пикопроекторов - в области электроники, автомобилей, промышленного

применения, и медицинского оборудования, а также мобильных телефонов - достигнет 3 млн. шт. в 2013 году, по сравнению с менее чем 50.000 шт. в 2009 году.

Microvision разрабатывает различные типы пикопрокторов, основанные на дисплейных технологиях с применением технологии сканирования лазерного луча, предназначенные для рынка высококомобильных потребителей и бизнес-пользователей, которым требуется большой экран везде, где бы они не находились.

Первоначально ожидалось, что конструкция оптического модуля Microvision, будет использоваться как часть устройства, которое может быть связано с различными устройствами, такими как сотовые телефоны или ноутбуки.

Оптический модуль может быть также разработан для встраивания его внутрь другого устройства, такого как мобильный телефон. Проецирование изображения на основе технологии сканирования лазерного луча является наиболее подходящей архитектурой для конструирования новых тонких проекторов. В такой конструкции не требуется пространственного модулятора света на дополнительной панели, а вместо этого на экран одновременно проецируется один пиксель в единицу времени.

Это отличие не только устраняет необходимость иметь относительно большой микродисплей, но и устраняет необходимость в проекционной оптике. Достигается это благодаря тому, что лучи красного, зеленого и синего цветов коллимируются и быстро сканируются сканирующим зеркалом, по одному пикселю сразу, и создают изображение на экране.

Изображение в проекторе хорошо сфокусировано и имеет большую глубину проекции. Это очень важный атрибут для проектора, который в основном должен использоваться в ручном режиме и иметь возможность настраиваться на различные проекционные расстояния.

С другой стороны, применение пикопроектора для движущихся виртуальных изображений может также развиваться на основе технологии сканирования лазерного луча. Технология сканирования лазерного луча позволяет создавать наשלменные и переносные дисплеи, обладающие высокой яркостью и компактными размерами.

Существуют два основных варианта конструкции проекторов со сканированием лазерного луча. Один из вариантов - использование двух зеркал для сканирования лазерного луча по каждой оси отдельно. В другом варианте используется только одно зеркало для сканирования луча по обеим осям. В последнем варианте предъявляются более жесткие требования к конструкции зеркала, но у него есть преимущества в плане сокращения размеров проектора. Это отчасти потому, что в двухзеркальной конструкции первое зеркало сканирует по поверхности второго зеркала.

Таким образом, второе зеркало должно быть достаточно большим, чтобы охватывать полную линию пятен, а не только одну точку. Это в дополнение к тем очевидным соображениям, что два зеркала, естественно, будут занимать больший объем, чем одно.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

Технология Microvision для проекционных дисплеев базируется на оптико-механической конструкции, включающей три лазера и двухосевое сканирующее зеркало.

Эта конструкция в сочетании с управлением видеосигналом и электроникой управления лазером и составляет пикопроектор. На рис.1.6 показана схема проекционной системы со сканированием лазерного луча [37,72].

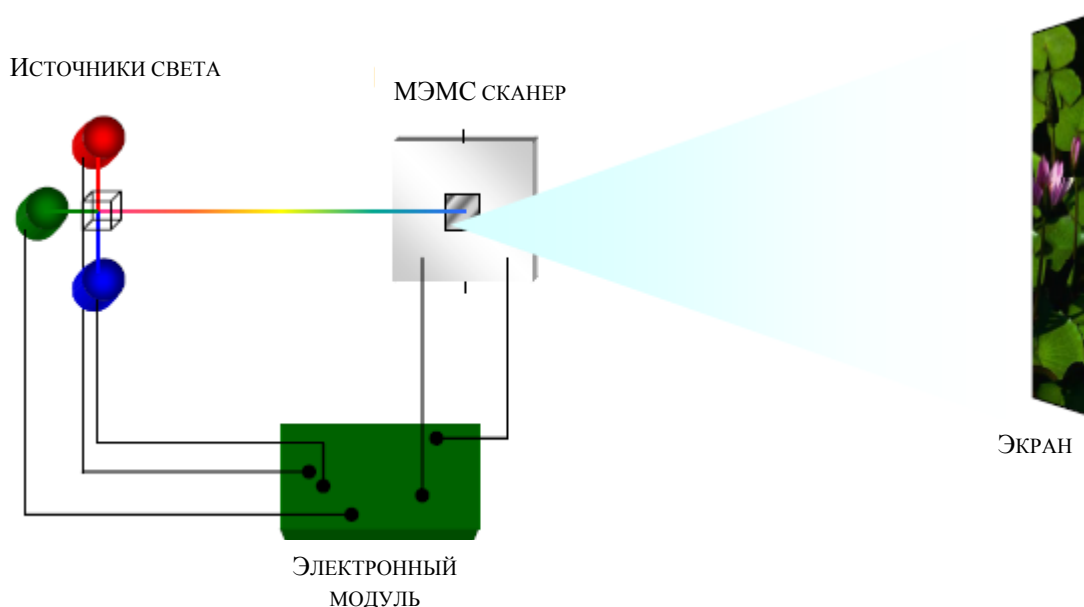


Рис. 1.6 ПРОЕКТОР СО СКАНИРОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Источники лазерного излучения могут быть как лазерными диодами поверхностного типа, так и инфракрасными лазерами с удвоением частоты. Три лазерных диода собраны таким образом, что их лучи при падении на сканирующее зеркало параллельны. И затем сканирующее зеркало направляет лучи света на плоскость, на которой рисуется изображение.

Потребляемая мощность проектора со сканированием лазерного луча значительно ниже. Поскольку каждый пиксель рисуется по одному сразу, интенсивность лазера модулирует требуемую яркость именно для этого пикселя. Это означает, что если изображение частично затемнено, лазеры выключаются для экономии энергии. Обычно движущиеся изображения проектируют от 15 до 40% средней интенсивности, излучаемой

тремя лазерами. Возможность выключения лазеров при формировании изображения является важным преимуществом этой конструкции.

БИ-МАГНИТНЫЙ СКАНЕР

Одинокое двухосевое сканирующее зеркало изготавливается из силикона при использовании MEMS технологии. Это однокое, относительно простое устройство позволяет миниатюризировать проектор, снижая до минимума потребление энергии и стоимость изготовления. Сканер производится на стандартном наборе оборудования, используемом при производстве MEMS. Все конструктивные элементы формируются в исходной кристаллической структуре подложки, что позволяет формировать чрезвычайно надёжную структуру даже для больших углов сканирования.

ТРАЕКТОРИЯ СКАНИРОВАНИЯ

Изображение создаётся благодаря сканированию лазерного луча с помощью MEMS зеркала [37,72]. Двухмерная траектория сканирования показана на рис.1.7.

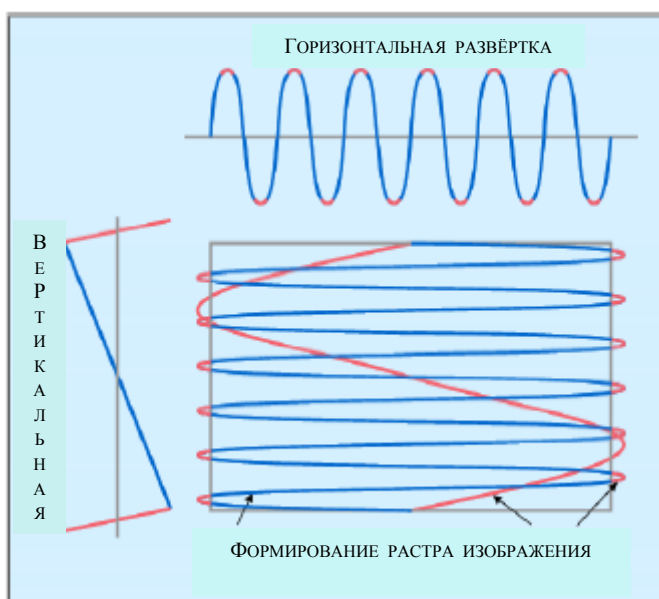


Рис. 1.7 ТРАЕКТОРИЯ СКАНИРОВАНИЯ

Для формирования прямоугольного изображения зеркало отклоняется с высокой частотой по горизонтали и с требуемой частотой кадров по вертикали. Типичное вертикальное сканирование – это однонаправленное качание на частоте 60Гц, которое ниже резонансной частоты зеркала по вертикали. Для обеспечения необходимого качества изображения и размера пятна диаметр зеркала составляет 1 мм. Но могут быть также спроектированы зеркала и с другими размерами.

На практике оптические углы сканирования находятся в пределах от 40 до 50° по горизонтали и от 20 до 30° по вертикали. Чтобы обеспечить размер пятна требуемого разрешения динамическая деформация зеркала должна быть минимальной. Кроме этого, больший угол сканирования позволяет сформировать больший размер изображения.

Горизонтальное сканирование происходит за счет качания горизонтальной оси на резонансной частоте – около 18 КГц для WVGA сканера. Скорость сканирования по горизонтали меняется синусоидально в зависимости от позиции луча. В контроллере используется обратная связь от сенсоров MEMS сканера для удержания резонансной частоты и фиксированной амплитуды сканирующей системы.

Изображение рисуется в двух направлениях, так как сканер проводит луч вперед и назад. Это улучшает эффективность системы по двум причинам. Во-первых, при возникновении резонанса для движения сканирующего зеркала необходима минимальная энергия. Во-вторых, двумерное видео увеличивает эффективность использования лазера благодаря уменьшению пустого интервала. Это увеличивает яркость проектора при любой выходной мощности лазера.

Вертикальное сканирование управляется стандартным сигналом пилообразной формы для обеспечения постоянной скорости от верхней до нижней части изображения и быстрого возвращения вверх, чтобы начать новый кадр. Для поддержания гладкой и прямолинейной траектории сканирования MEMS контроллер управляет им по замкнутому циклу на основе данных обратной связи, поступающих от MEMS сканера.

Привод MEMS

Существует несколько вариантов управления MEMS зеркалом [37,72]. В настоящее время Microvision использует новую схему магнитного привода, которая позволяет сделать конструкцию сканера без прямого ёмкостного управления быстрой оси. Этот более эффективный механизм привода упростил изготовление MEMS и позволил сканеру работать в воздушной среде, что также значительно упрощает конструкцию MEMS.

Принцип работы двухосевого магнитного привода заключается в наложении моментов для двух направлений сканирования и приложении суммарного момента под углом примерно 45° по отношению к двум осям сканирования, как показано на рис.1.8.

Таким образом можно обеспечить работу сканера по обеим осям, применяя только один механизм привода. Частоты компонентов крутящего момента выбраны для возбуждения горизонтального резонанса зеркала (18КГц) и для обеспечения рамкой привода вертикального движения зеркала (первая гармоника: 60 Гц, вторая гармоника: 120 Гц, третья гармоника: 180 Гц, и т.д). Компоненты крутящего момента - частота вращения зеркала и частота движения рамки действуют раздельно.

Магнитное поле, действующее на катушку привода посредством внешних магнитов в плоскости катушки, имеет почти равномерную величину и ориентацию по площади катушки и наклонено примерно на 45° по отношению к двум осям привода. Поверхностный ток в катушке обмотки взаимодействует с поверхностным магнитным полем для возбуждения силы Лоренца в проводниках.

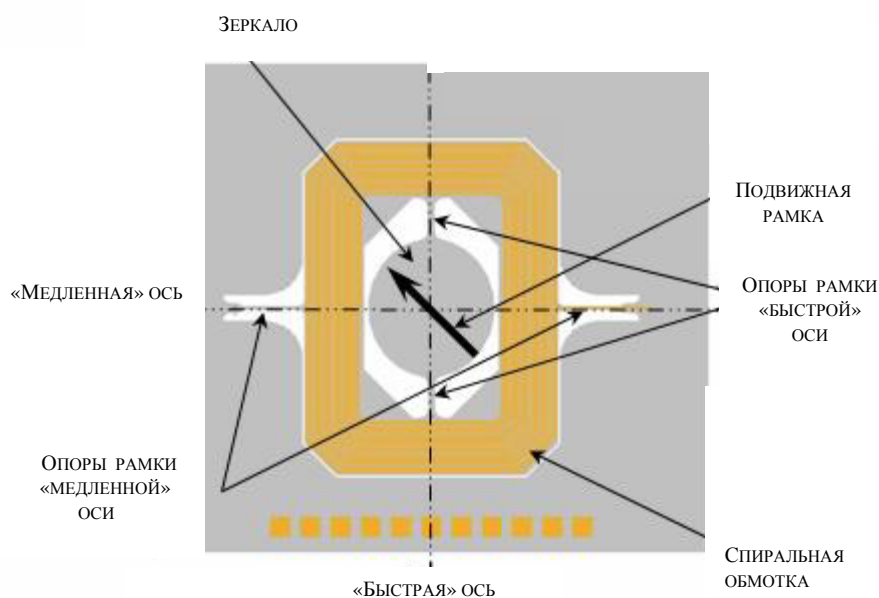


Рис. 1.8 Привод MEMS зеркала

Так как ток привода образует петлю на рамке, он меняет знак во время сканирования. Это значит, сила Лоренца также меняет знак при пересечении осей сканирования в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Суммарный крутящий момент порождает движение по двум направлениям сканирования, в зависимости от частотной составляющей.

Магнитный привод сканера может работать при напряжении менее ± 5 В, в то время как для работы электростатического привода требуется напряжение ± 200 В. В результате чего нет нужды в трансформаторах для обеспечения такого высокого напряжения. И кроме этого система упрощается из-за устранения необходимости работы в вакууме.

ПАРАМЕТРЫ MEMS

Основные параметры MEMS это угол сканирования, размер зеркала и частота сканирования. Для правильного определения ограничений в конструкции сканера необходимо учитывать ряд компромиссов. Критическими характеристиками движения сканера в дисплее являются разрешение и частота кадра. Разрешение для сканера может быть определено как функция произведения угла сканирования на размер зеркала, $\theta \times D$. Так как

пиксели образуются путём модуляции лазеров во время сканирования луча, большой конус сканирования обеспечивает большую площадь воспроизведения пикселей.

Кроме этого, размер MEMS определяет размер лазерного пятна. Горизонтальная резонансная частота выбирается таким образом, чтобы обеспечить нужное количество синусоидальных колебаний на кадр. Эти характеристики определяют частоты сканирования также как и угол максимального сканирования “ θ ” и диаметр зеркала “D”, которые для систем сканирования обычно указываются в сочетании θ -D как произведение.

Высокие требования к динамическим и оптическим характеристикам сканера во время движения определяются требованиями к качеству изображения пикселя и точности проекции дисплея. При частоте кадра 60 Гц требуется частота линии 36Гц для достижения SVGA разрешения. Частота линии в два раз больше частоты сканера, потому что две горизонтальные линии сканируются за один период колебаний сканера.

Для хорошего качества изображения важно, чтобы для каждого кадра пиксели точно оставались на одном и том же месте. В то время как однонаправленная схема может обеспечить хорошую позиционную равномерность линии, двунаправленная схема уменьшает частоту нагрузки сканера и увеличивает рабочий цикл источников света.

Microvision выбрала двунаправленную схему с высокой резонансной частотой ”быстрой оси” по горизонтали и нерезонансное линейное качание ”медленной оси” как предпочтительную архитектуру системы. Для снижения требований к приводу, налагаемых линейной модуляцией, также была рассмотрена альтернативная синусоидальная траектория сканирования медленной оси с использованием резонансного отклика другой оси.

И хотя при данном подходе есть преимущества в размерах, всё же сложные фигуры Лиссажу, появляющиеся при этом, и повышенные требования к частоте движения быстрой оси делают предпочтительнее для большинства приложений использование линейной модуляции. В табл.1.8 ниже показан типичный набор требований к сканеру для различных разрешений, предъявляемых к двунаправленным системам сканирования с частотой обновления кадра 60Гц [37,72].

Таблица 1.8

Разрешение	VGA	WVGA	SVGA	HD720	SXGA	HD1080
По горизонту	640	854	800	1280	1280	1920
По вертикали	480	480	600	720	1024	1080
Угол, градус	7,8	9,7	9,7	11	15,6	23,3
Частота, кГц	18	18	20	28	40	42

При переходе от WVGA разрешения к разрешению высокой чёткости 720 требуется только увеличить угол сканирования на 13%. Это может быть достигнуто путём увеличения угла сканирования без изменения размера зеркала. Поэтому MEMS сканер для разрешения высокой чёткости будет иметь тот же размер, как и для WVGA разрешения. И в результате чего весь лазерный сканирующий модуль не будет увеличиваться в размерах при использовании его для проектора высокой чёткости.

MEMS СКАНЕР

В настоящее время Microvision использует MEMS сканер для WVGA разрешения.

Этот сканер имеет частоту развёртки приблизительно 18 КГц и максимальный механический угол сканирования +/- 12,6 градусов. +/- 12 градусный угол работы механики обеспечивает угол проекции сканера 43 градуса и даёт возможность расширить эффективную диагональ экрана на заданной дистанции для любого проектора в появившемся классе пикопрокторов.

Усовершенствованная конструкция привода обеспечивает низкое энергопотребление, высокую производительность для MEMS технологии, имеет низкую стоимость и приемлемые размеры, необходимые для потребительского рынка.

Модуль был спроектирован компактным и пригодным для изготовления в массовом производстве. Окончательная конструкция модуля показана на рис.1.9 [72].

Благодаря высокой производительности, компактности, и простоте в изготовлении этот модуль WVGA сканера хорошо подходит для сканирующего лазерного проектора в качестве встраиваемого в мобильные устройства. 6.6 мм толщина и размер модуля MEMS делают его самым тонким проектором, предлагаемым сегодня на рынке.

Кроме того, в будущем есть возможность довести толщину до 5мм путём дальнейшей оптимизации конструкции магнита и сборки, сделав модули со сканированием лазерного луча ещё тоньше.



Рис. 1.9 Модуль MEMS СКАНЕРА

ЛАЗЕРЫ ДЛЯ MEMS СКАНИРОВАНИЯ

Наличие подходящих лазерных источников является ключевым фактором для реализации сканирующих лазерных проекторов, которые могут помещаться в сотовых телефонах и других портативных устройствах. Раньше проекторы со сканированием луча были ограничены большими размерами осветительных систем, собранных отдельно от дисплея. Недавнее появление синих инжекционных лазеров, наряду с давно существующими красными лазерными диодами, позволяет ускорить процессы в технологии со сканированием лазерным лучом.

Технология непосредственной модуляции источника света является ключевой для реализации системы высокого качества изображения с 16-битной глубиной цвета.

Дисплей, использующий двухосевое сканирующее зеркало должен “рисовать” порядка 1млн пикселей за 1/60 секунды. Таким образом скорость модуляции может быть выше, чем 100 МГц для высоких разрешений.

Использование внешних модуляторов для реализации такого диапазона пикселей, таких как акустооптические выключатели, приведёт к чрезвычайно большой стоимости, размерам и затрачиваемой мощности.

Возможность непосредственной модуляция лазера с использованием собственного тока является весьма существенной особенностью. Для этого требуются высокоскоростные схемы запуска лазера, быстродействующие лазеры и стабильность технических характеристик лазерного луча вне зависимости от нагревания прибора или изменений температуры окружающей среды.

В связи с синусоидальным профилем скорости сканирования в горизонтальном направлении, продолжительность изображения пикселей в пределах горизонтальной линии меняется. Пиксели, образованные на краю линии горизонтальной развёртки изображаются дольше, чем пиксели, находящиеся в центре линии развёртки.

Для WVGA разрешения требуемая скорость модуляции в центре сканирования составляет около 50 МГц. Эта скорость модуляции увеличивается до 100 МГц для высокого разрешения.

Большая цветовая гамма обеспечивается благодаря монохроматическим лазерным источникам. Эти источники обладают высокой насыщенностью цвета. Зелёный источник света имеет длину волны 530 нм в отличие от RGB стандарта, у которого длина волны около 555 нм. Это расширяет цветовую гамму в зелёную область благодаря блестящему представлению цветов.

Развитие лазеров прогрессирует в последнее время, их производство неуклонно растёт. Теперь доступны одномодовые красные лазеры с выходной мощностью более 100 мВт.

Длина волны красного лазерного диода смещается от 642 нм до 638 нм при комнатной температуре, увеличивая чувствительность человеческого глаза. Как результат, уменьшается необходимая мощность лазера для достижения той же яркости и потребляемая мощность красного лазера также уменьшается.

Значительный прогресс достигнут также и в создании зелёных лазеров. Сейчас доступны зелёные лазеры с удвоенной частотой, что отвечает всем требованиям сканирующих дисплеев. В ближайшем будущем зелёный лазер будет аналогичен по размерам синему лазерному диоду и меньше, чем существующие зелёные лазеры с удвоенной частотой. Кроме того, зелёный лазерный диод можно будет модулировать на очень высоких скоростях, как требуется для высоких разрешений.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПИКОПРОЕКТОРА (PiCoP)

Оптическая система проектора выполняет три функции: формирование и фокусировка луча, совмещение лучей и их объединение. Цель формирования луча - преобразовать луч в точке фокусировки, чтобы достичь требуемого разрешения сканера. Диаметр луча не должен превышать размер пикселя и может расширяться в зависимости от проекционного расстояния. Лазерные лучи объединяются и достигают поверхности MEMS как один луч. Затем MEMS сканирует объединённым лазерным лучом и создает изображение на экране.

На рис. 1.10 показан вид оптической системы пикопроектора [37,72].

Достигнутые на сегодня размеры оптико-механического модуля сканирования составляют 42 x 20 x 7 мм. Этот модуль был разработан для массового производства.

Три лазера собраны индивидуально, но при этом, вместе с красным и синим лазером, в единой упаковке может собираться и зелёный лазер. На рис. 1.11 показан модуль сканирования [72].

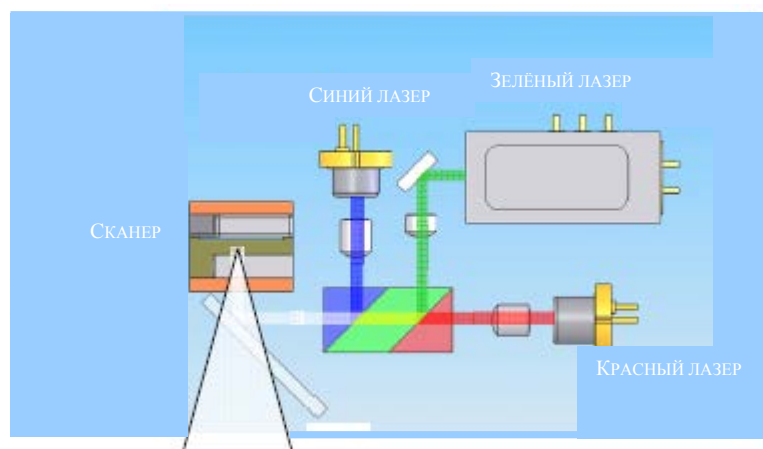


Рис. 1.10 Оптическая система пикопроектора

Размер модуля сканирования может быть дополнительно уменьшен путем применения технологии, используемой при производстве головки для оптической записи. Эта технология предусматривает установку лазера непосредственно на радиатор без дополнительной упаковки.

Записывающая головка с двойным лазером имеет объем меньше чем 100 мм^2 и высоту только 4 мм. Модуль сканирования может быть выполнен близко к этому размеру даже при том, что имеет дополнительные элементы – на один лазер больше и MEMS зеркало.

При размере в длину и высоту 5 мм пакета MEMS, весь модуль сканирования может составить только 5 мм высотой, при использовании оборудования и стандартов, которые применяются при производстве записывающей головки. При переходе к более высокому разрешению не потребуется увеличения размера модуля сканирования.

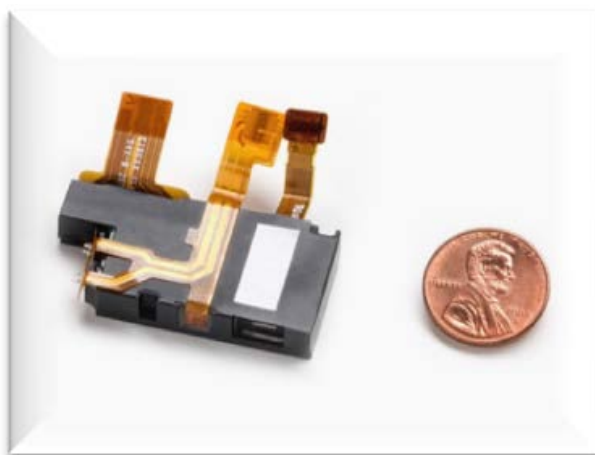


Рис. 1.11 Модуль сканирования

Поэтому, в отличие от проекторов на основе панелей конкурирующих технологий, таких как DLP или LCOS, где толщина и размер увеличивается с переходом к более высоким разрешениям, размеры модуля сканирования лазерного луча для более высоких разрешений не меняются.

ПРОЕКТОР

Проектор, основанный на модуле сканирования лазерного луча, имеет преимущество по сравнению с проекторами с использованием микродисплея благодаря тому, что изображение сфокусировано в широком диапазоне расстояний от проектора.

Лазерные лучи проектируются таким образом, что диаметр пучка не превышает размер пикселя и не расширяется с увеличением расстояния во всем диапазоне проекции. Этот бесконечный фокус пучка создается на некотором расстоянии, после чего лазерный пучок

будет расширяться медленнее, чем пиксели. Как видно из рис.1.12, фактический размер лазерного пучка немного меньше, чем размер пикселя [72].

Большой угол сканирования зеркала MEMS проецирует большее изображение и, как правило, больше, чем это достижимо с проекторами на основе малоформатных микро-дисплеев. При угле сканирования 43 градуса по горизонту пикопроектор Microvision имеет проекционное отношение почти 1:1.

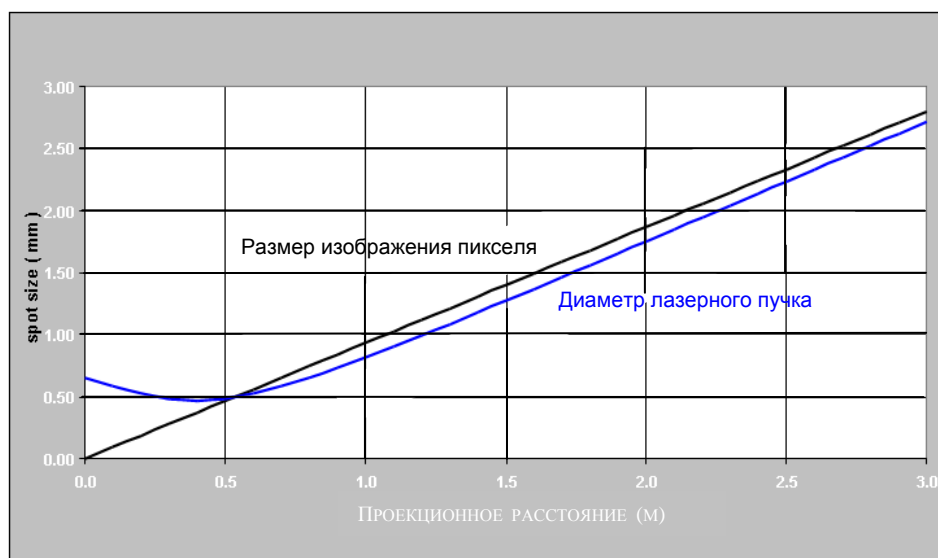


Рис. 1.12 ЛАЗЕРНЫЙ ПУЧОК И РАЗМЕР ПИКСЕЛЯ

Сканирующий лазерный лучевой проектор будет иметь определенный уровень спекла, но сканирующее движение лазерного луча эффективно сокращает замечаемый контраст спекла приблизительно на 50%. Кроме того, точный контроль размера сканирующего лазерного луча и устранение электрического шума делает изображение таким, что спекл становится едва заметным для большинства изображений. К тому же, существуют методы снижения спекла, которые могут быть применены для его сокращения до уровня, когда он будет практически незаметен.

В настоящее время световой поток сканирующего лазерного проектора составляет около 10 люмен. С лазерами проекторы становятся все более эффективными и более мощными, есть четкий путь для создания лазерных проекторов со световым потоком от 15 до 20 люмен. В связи с увеличением эффективности лазеров и электронных компонентов, эти более высокие уровни яркости не приведут к увеличению мощности потребления. Кроме того, пикопроектор со световым потоком 20 люмен можно отнести ко 2 классу лазерных устройств.

Классификация лазеров для проекторов со сканированием лазерного луча определяется выходной мощностью лазеров, частотой сканирования, углом сканирования и размером

пучка. Из-за насыщенности цвета лазера, изображение кажется более ярким, чем изображение проектора с использованием ламп или светодиодов, что также известно как эффект Гельмгольца-Кольрауша.

Достижимый контраст дисплея со сканированием лазерного луча стремится к бесконечности, потому что лазерный луч может быть полностью выключен для тёмных пикселей. Пикопроектор продемонстрировал контраст более 10.000:1.

Проектируемое изображение фактически свободно от искажения. Обычно дисплеи со сканированием луча имеют дисторсию изображения, потому что изображение сканируется по сферической поверхности вокруг проектора. Поэтому проектирование на плоскую поверхность искажает изображение. Традиционно дисторсия исправляется, используя стандартные 2-D методы интерполяции. Однако, эти методы интерполяции эффективно уменьшают разрешение. В пикопроекторе Microvision дисторсия устранена оптическим методом с помощью корректирования пути сканирования лазерного луча. Этот метод гарантирует сохранение разрешения.

ДРУГИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

НАШЛЕМНЫЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ ДИСПЛЕИ

Помимо пикопроектора, дисплей со сканированием лазерного луча из-за высокого контраста изображения, цветовой насыщенности и малого формата может стать естественным приложением и для нашлемных и переносных дисплеев, вмонтированных в очки. В обоих этих типах дисплеев создаётся виртуальный образ. Виртуальное изображение углового пространства передаётся в глаза, где помощью окуляра строится изображение на сетчатке. Традиционно, виртуальный образ формируется путем преобразования малого 2-мерного изображения углового пространства, где каждый пиксель представляет определенный угол.

Лазерные дисплеи особенно хорошо подходят для формирования виртуального образа, потому что форма лазерного пучка может быть легко изменена, что позволяет эффективно применить лазерные дисплеи для конструирования систем с низким энергопотреблением.

Дисплеи со сканированием лазерного луча также хорошо подходят для нового класса виртуальных дисплеев, так как лазерный сканер непосредственно создает изображение в угловом пространстве. В этом случае, нет необходимости в оптике, которая преобразует 2-мерное изображение в угловом пространстве, что экономит размер и вес. Это представляет особый интерес для переносных дисплеев, где малые размеры и низкий вес являются важными требованиями.

Схематический вид виртуального дисплея на базе дисплея со сканированием лазерного луча показан на рис.1.13 [72].

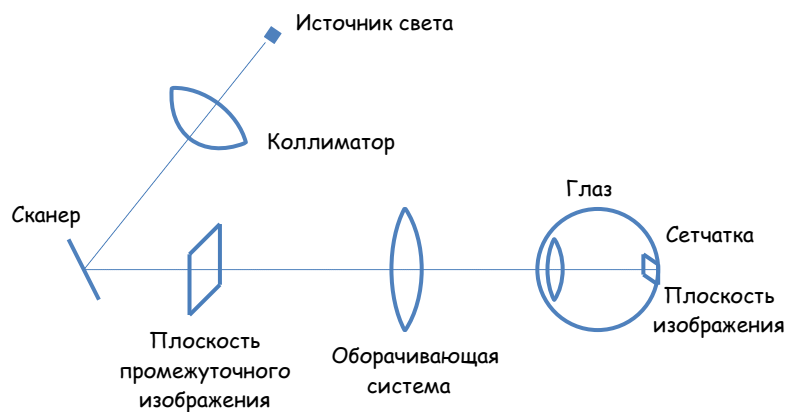


РИС. 1.13 ВИРТУАЛЬНЫЙ ДИСПЛЕЙ

Лазерный луч сканирует промежуточную плоскость изображения. Это промежуточное изображение преобразуется с помощью оборачивающей системы в виртуальное изображение. Оборачивающая система концентрирует свет на относительно небольшой площади, где виртуальное изображение можно рассматривать.

В случае нашлемных дисплеев рассматриваемая область обычно имеет размер менее 20 см x 10 см. В результате яркость может быть высокой. Microvision достигла значения яркости до $20,000 \text{ кд/м}^2$ в нашлемном дисплее со сканирующим лазерным лучом. Полученное изображение отчетливо видно даже при самом ярком дневном свете.

Промежуточная плоскость изображения строится с помощью микрооптики. Такая оптика позволяет контролировать расширение лазерных пучков. Кроме того, система, где промежуточная плоскость находится на гладкой поверхности микролинз, свободна от спекла.

Нашлемные дисплеи используются в ситуациях, где изображение рассматривается в условиях широкого диапазона освещенности. Высокий контраст делает технологию сканирования лазерного луча чрезвычайно пригодной для приложений, где высокий контраст и просмотр через защитное стекло являются важными. Существующие нашлемные и переносные дисплеи основаны на ЖК-дисплеях со светодиодной подсветкой. Эти системы имеют относительно низкий контраст и плохую эргономику.

Нашлемные и переносные дисплеи на основе сканирования лазерным лучом не имеют посторонних изображений даже при низких экологических условиях освещения.

Насыщенные цвета лазера более отчетливо выделяют изображение на фоне окружающей среды. Как результат, дисплей предоставляет больший объем информации об окружающем мире, что может улучшить безопасность пользователя.

3Х-МЕРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Бесконечная глубина фокуса в дисплее со сканированием лазерного луча также позволяет применять его для других приложений, таких как 3D-изображений. Традиционно, в 3D изображении используется либо триангуляция с сканированием лазерного луча, либо структурированное освещение, создаваемое проектором. Проектор со сканированием лазерного луча сочетает в себе глубину резкости лазерной линии с возможностью дисплея со структурированной подсветкой. Это способствует быстрому воспроизведению изображений 3-мерных объектов с большой вариацией по глубине.

Дисплей может быть создан путем сканирования лазерного луча с зеркалом MEMS и модуляции лазеров, синхронизированных с положением зеркала. Сканирование лазерных пучков показывает значительные преимущества по сравнению с традиционными дисплеями и системами визуализации.

Эти преимущества включают: уменьшение размеров оптического модуля, который может быть сокращен еще больше в будущем, при этом размеры модуля не возрастают с увеличением разрешения; высокий контраст изображения ($> 10000:1$) и высокое разрешение. Кроме того, проектор на основе сканирующего лазерного луча по своей сути имеет бесконечную глубину резкости, предусматривающую четко сфокусированное изображение на неровных поверхностях плоскости проекции, открывая широкий спектр возможностей для применения.

Дисплей со сканированием лазерным лучом предоставляет пользователям мобильных устройств возможность проецировать изображения на большом экране с помощью небольшого встроенного проектора. Эти потенциальные продукты позволят пользователям смотреть фильмы, играть в видео, просматривать изображения и другие данные на различных поверхностях. Эта же конструкция с некоторыми изменениями может быть применена в виртуальных дисплеях для отображения реальности, в настольных и переносных дисплеях.

Выводы по главе 1

Аналитический обзор современных проекционных технологий и принципов построения проекционных систем показал:

1. Минипроекторы представляют одно из наиболее перспективных направлений развития мобильных устройств. Этому способствует удачная комбинация DLP-технологии и SSL-технологии твердотельных источников света (светодиодов LED или лазеров LD).

2. Классификации минипроекторов по потребительским свойствам позволяет оценить рыночную конъюнктуру (сегменты рынка, цена) и определить наиболее востребованные конфигурации таких систем. К ним относятся встроенные, мобильные, переносные.

3. Классификация по техническим параметрам (габаритные размеры, яркость изображения, разрешение, световая эффективность) позволяет определить научные направления развития, функциональные особенности и пути совершенствования минипроекторов.

4. Перспективными и ключевыми направлениями развития минипроекторов являются совершенствование осветительных систем с целью повышения яркости изображения, уменьшение габаритных размеров объективов минипроекторов, а также разработка компактных оптических модулей минипроекторов, расширяющих их функциональные возможности (внутренняя фокусировка, переменное увеличение).

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МИНИПРОЕКТОРОВ

2.1 ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИНИПРОЕКТОРА

Проекционная система предназначена для создания действительного и увеличенного изображения на экране. В зависимости от типа проецируемого предмета различают диаскопическую и эпископическую проекции. Диапроекция – проекция в проходящем свете, эпипроекция – проекция в отраженном свете.

В современных мультимедийных проекторах используются оба вида проекции.

Это проекторы, построенные на основе просветных жидкокристаллических LCD матриц, проекторы, построенные на основе отражающих микрозеркальных DLP (DMD) и отражающих жидкокристаллических LCoS микродисплеев и проекторы со сканированием лазерного луча.

В настоящей работе будут рассмотрены преимущественно отражающие минипроекторы и проекторы со сканированием лазерного луча.

Оптическая схема отражающего минипроектора в простейшем виде изображена на рис.2.

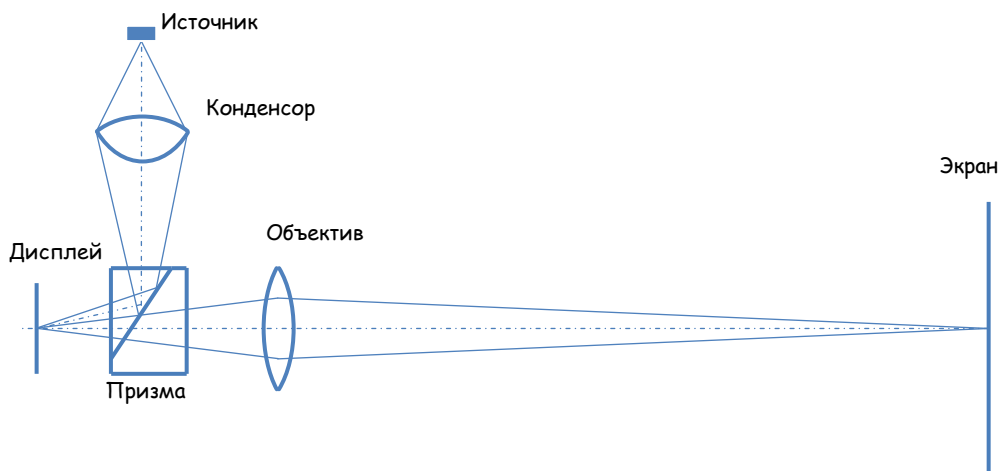


Рис. 2 Отражающий миниПРОЕКТОР

Оптическая схема отражающего минипроектора работает следующим образом. Осветитель, состоящий из источника света (группы источников), конденсора (системы линз) и призмы (блока призм), проецирует изображение источника света в плоскость отражающего микродисплея. Объектив минипроектора строит увеличенное изображение микродисплея с требуемой освещённостью на экране.

На рис.2.1-2.3 приведены примеры построения оптических схем минипроектора на основе светодиодов (LED).

Оптическая схема на рис.2.1 имеет более простую и компактную конфигурацию.

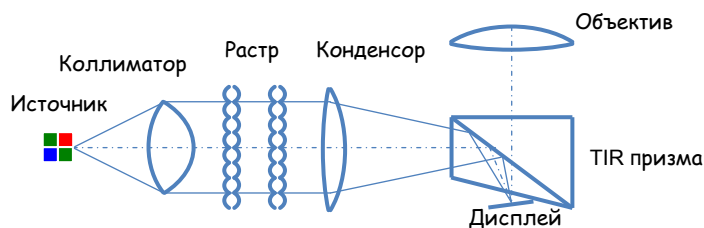


Рис. 2.1 МиниПРОЕКТОР С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ СВЕТА

Свет от четырёх светодиодов (RGGB) собранных в едином кластере, собирается и коллимируется одиночной линзой. Пройдя через голографический диффузный элемент или многолинзовый растр, пучок света преобразуется из неравномерной круглой формы в равномерный прямоугольной формы и попадает на отражающий микродисплей.

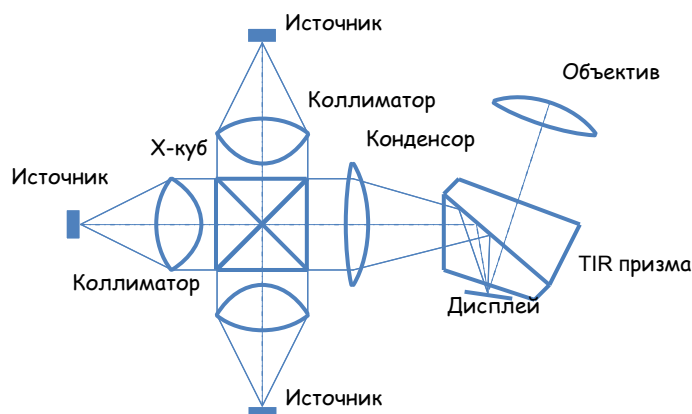


Рис. 2.2 МиниПРОЕКТОР С ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ КУБИКОМ

В оптической системе на рис.2.2 использована схема освещения с тремя отдельными светодиодами. Свет каждого источника коллимируется отдельной линзой, затем с помощью поляризационного кубика (X-куб) собирается в общий пучок, проходит конденсор и призму с полным внутренним отражением (TIR) и попадает на отражающий микродисплей.

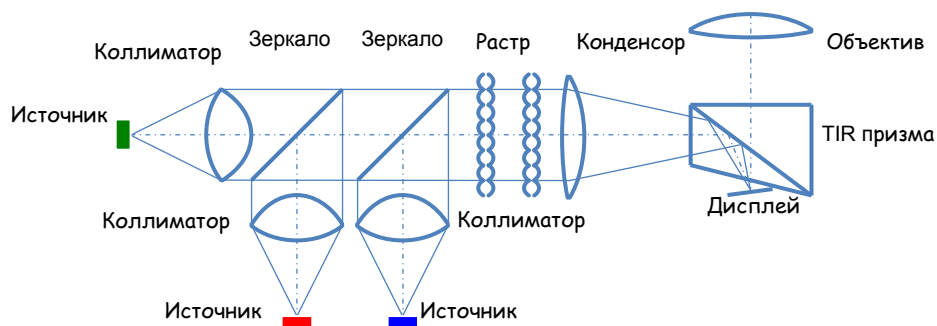


Рис. 2.3 МиниПРОЕКТОР С ДИХРОИЧНЫМИ ЗЕРКАЛАМИ

В оптической системе на рис.2.3 использована схема освещения с тремя отдельными светодиодами, коллимированный свет от которых, пройдя через дихроичные зеркала, собирается в общий пучок, проходит через конденсор с линзовым растром, попадает на призму с полным внутренним отражением (TIR) и затем на отражающий дисплей – микрозеркальный оптический модулятор.

На рис.2.4 показана оптическая схема минипроектора со сканированием лазерного луча, которая имеет минимальное количество оптических элементов – три лазера, два дихроичных зеркала и 2х-координатный сканер.

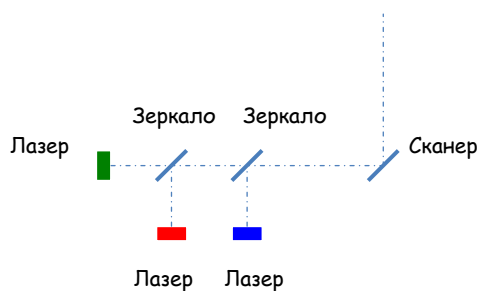


Рис. 2.4 МиниПРОЕКТОР СО СКАНИРОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

2.2 ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МИНИПРОЕКТОРОВ

Осветительная система минипроектора включает различные оптические элементы: коллимирующие линзы, светоделительные и комбинирующие призмы, отражатели, концентраторы, интеграторы, рассеивающие элементы, линзовые растры, дихроичные зеркала, оптические фильтры, поляризаторы и др.

Элементы могут иметь различную геометрическую форму (круглые, прямоугольные) и форму оптических поверхностей (сферические, асферические, цилиндрические).

На рис.2.5 показаны различные схемы минипроекторов в зависимости от типа оптического модулятора света (LCoS, DLP) и типа источника света (LED или LD):

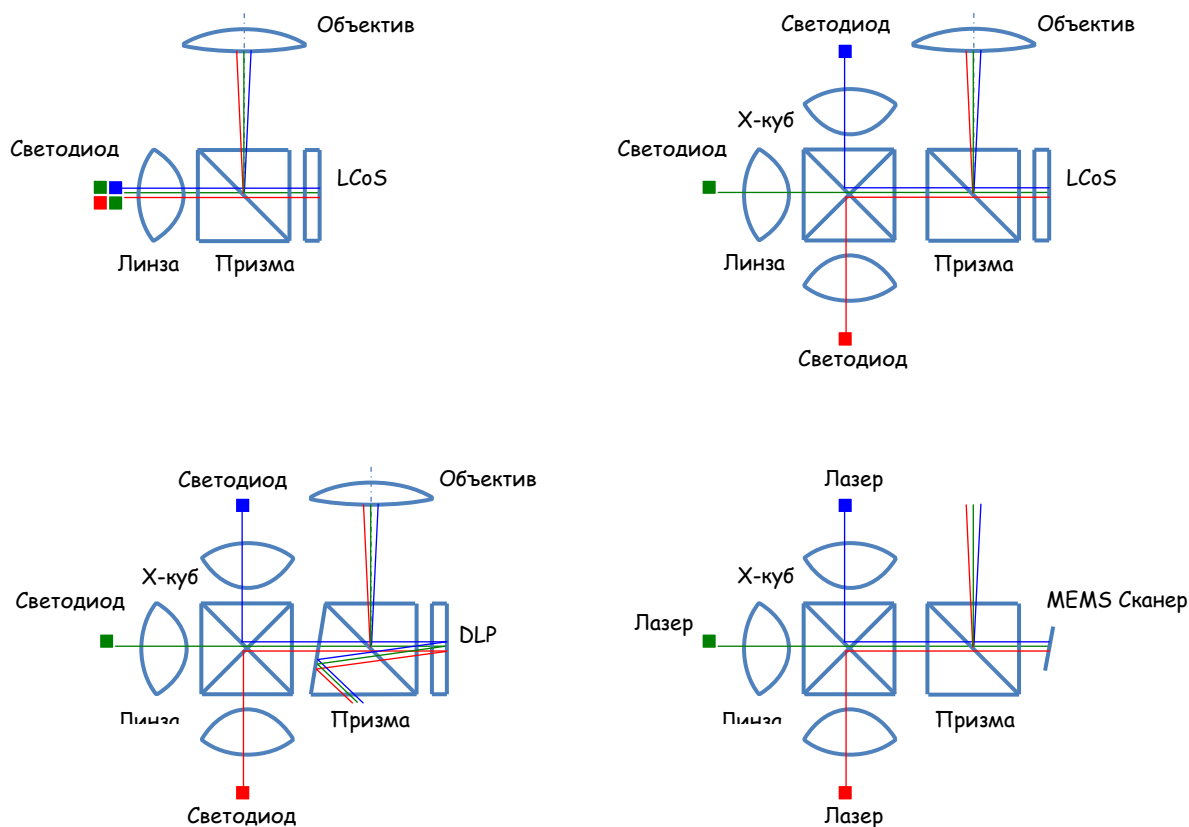
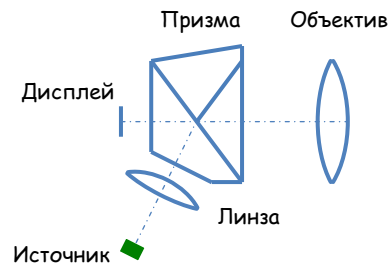


РИС. 2.5 ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МИНИПРОЕКТОРОВ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

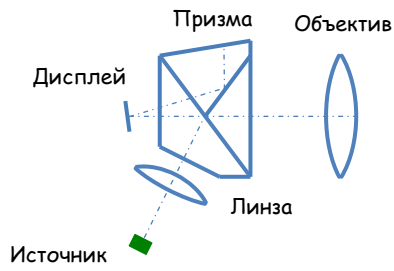
В составе осветительных систем проекторов применяются и различные светоделительные элементы – зеркала, призмы. Они играют большую роль в работе проектора и, в конечном счёте, существенно влияют на выходные характеристики проектора – эффективность светового потока, цветопередачу.

Примеры светоделительных призм, применяемых в проекторах, приведены на рис.2.6.

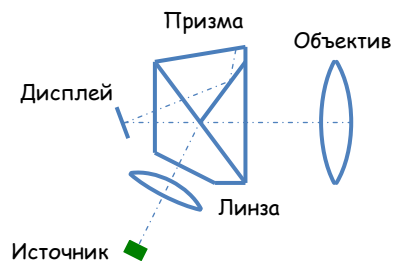
На рис. 2.6а-2.6г показана типовая структура проектора на базе технологии DLP с TIR – призмой. На рис. 2.6е показана типовая структура проектора на базе трех LCoS – микродисплейных модуляторов.



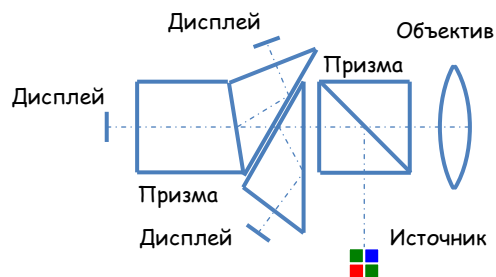
а



б



в



г

РИС. 2.6 ТИПЫ СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПРИЗМ

Входной немодулированный и неполяризованный пучок света поступает на грань поляризующего расщепителя (PBS-призма). При отражении пучок света становится преимущественно поляризованным в плоскости s . Эффект поляризации обеспечивается за

счет многослойной оптически анизотропной пленки, нанесенной на грань призмы-поляризатора.

Далее отраженный поляризованный пучок света проходит через слой ЖК-материала, отражается от зеркальных электродов пикселя и проходит снова через слой ЖК-материала, который является динамическим поляризатором и локально изменяет направление s -вектора поляризации входящего пучка света на направление p -типа в зависимости от приложенного напряжения.

В результате пучок света становится пространственно поляризованным. Для визуализации изображения на выходе модулятора стоит второй поляризационный фильтр (анализатор) с направлением p -вектора поляризации. Через него проходит только та часть пучка света, которая имеет тот же p -вектор поляризации. То есть в исходном состоянии с выключенным питанием экран микродисплея, работающий на отражение, имеет темное состояние.

В цветоделительном кубе блока модуляторов происходит разделение цветовых компонент и распределение в плоскости трех микродисплейных модуляторов. Отраженные модулированные световые потоки затем проходят через светорасщепительную призму в проекционный объектив.

2.3 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

В настоящее время при создании портативных и компактных электронных устройств требуется постоянно искать новые конструктивные решения, которые позволили бы значительно сократить размеры оптического модуля. Чем тоньше и меньше оптический модуль, тем проще его интегрировать в такие устройства, как мобильный телефон, цифровой фотоаппарат и портативный медиаплеер. В полной мере это касается и минипроектора. А с появлением миниатюрных источников света (светодиодов и лазерных диодов) эти тенденции приобрели ещё большую актуальность.

При конструировании осветительных систем на основе лазера необходимо решить несколько задач:

- *преобразование лазерного излучения с распределением интенсивности по закону Гаусса в пучок с равномерным распределением;*
- *формирование на выходе осветительной системы пучка требуемой геометрической формы – в виде линии, круга или прямоугольника;*
- *компенсация выходного угла расходимости лазера;*
- *фокусировка излучения.*

Лазерные диоды излучают расходящийся пучок света с распределением интенсивности по закону Гаусса. Для большинства современных устройств, использующих в качестве источника света лазеры, необходимо обеспечить равномерную освещённость в плоскости оптического модулятора.

В опубликованных работах [9-12,71,73,76] описаны различные методы трансформации пучка Гаусса в пучок с равномерным распределением. Например, на основе пары обычных преломляющих линз со сферической или асферической формой, которые с помощью вносимых aberrаций реформируют входное излучение и делают его коллимированным на выходе. Эти решения построены по схеме телескопа Кеплера или Галилея.

Основной недостаток таких систем это сложность в изготовлении асферических поверхностей, и в особенности отрицательных элементов с вогнутой поверхностью – имеющих большие значения отклонения формы асферической поверхности от опорной сферы.

2.4 АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ

Как указывалось выше, одним из методов преобразования лазерного излучения гауссова пучка в пучок света с равномерным распределением интенсивности заключается в радиальном перераспределении энергии в пучке света.

В схеме Галилея такое преобразование входного коллимированного пучка происходит на асферической вогнутой поверхности первого элемента, причём таким образом, что крайние лучи расходящегося пучка света отклоняются сильнее, чем осевые, а после второго элемента пучок становится вновь коллимированным.

В схеме Кеплера падающий на первый элемент коллимированный пучок света преобразуется в сходящийся, причём так, что крайние лучи отклоняются сильнее, чем осевые. И в том и другом случае пучок света на выходе имеет равномерное распределение интенсивности, описываемое функцией Ферми-Дирака относительно распределения интенсивности входного пучка на уровне $1/e^2$.

В авторской работе [80] были предложены варианты преобразователя лазерного излучения.

На рис.2.7а представлены несколько примеров конструкции преобразователя лазерного излучения, отличающихся количеством элементов и коэффициентом увеличения.

Коэффициент увеличения зависит от различных факторов: параметров лазера, размера модулятора, характеристик разрабатываемого устройства.

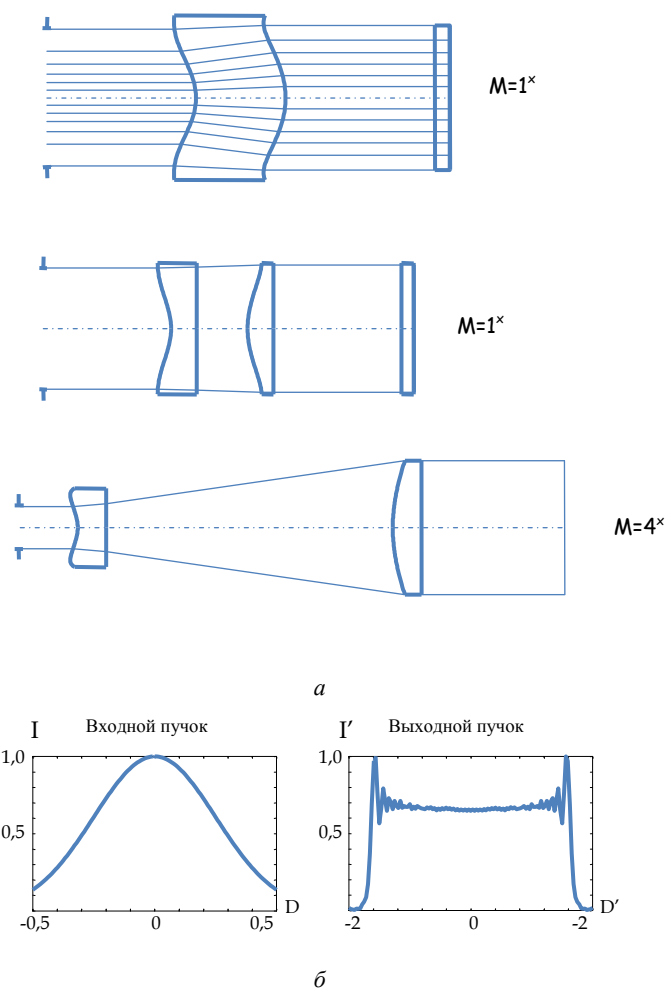


Рис. 2.7 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ

a – виды преобразователей; *b* – графики распределения интенсивности

На рис.2.7б приведены графики распределения интенсивности входного и выходного пучков.

Таблица 2.6

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коэффициенты асферики
1	∞	10	1		
2	-30,57	1	1,5312	56,0	$a_1=-1,6861E-01$ $a_2=2,3821E-02$ $a_3=-1,5191E-03$ $a_4=4,7873E-05$
3	∞	2	1		
4	14,132	1	1,5312	56,0	$a_1=-8,5941E-02$ $a_2=-7,3822E-03$ $a_3=4,0927E-04$ $a_4=-4,2362E-05$
5	∞	5	1		
6	∞	0,5	1,5168	64,2	

Таблица 2.7

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии V_d	Коэффициенты асферики
1	∞	10	1		
2	-4,427	1	1,5312	56,0	$\alpha_1=-2,3347E-01$ $\alpha_2=2,2245E-01$ $\alpha_3=-1,3738E-01$ $\alpha_4=4,3182E-02$
3	∞	10	1		
4	17,41	1	1,5312	56,0	$\alpha_1=4,1371E-02$ $\alpha_2=-9,1556E-04$ $\alpha_3=8,95037E-06$ $\alpha_4=-3,5656E-06$
5	∞	10	1		

В таблицах приведены конструктивные параметры 2х-линзовых преобразователей лазерного излучения. В таблице 2.6 – параметры преобразователя с увеличением $M=1^x$, в таблице 2.7 – параметры преобразователя с увеличением $M=4^x$.

Асферические поверхности линз рассчитывались по формуле:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8$$

2.5 ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ФОРМИРОВАТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рис.2.8 показан пример осветительной системы с лазерным диодом, описание которой дано в [69] и предназначенной для сканирующего проекционного дисплея с одномерным пространственным модулятором света. В верхней части рисунка показан вид элементов в плоскости так называемой «быстрой» оси лазера (ось с большим углом расходимости), в нижней части рисунка – вид элементов в плоскости «короткой» оси.

Реформирование лазерного излучения в этой системе происходит в несколько этапов и за каждый этап отвечает свой элемент. Первый элемент – линза коллиматора, которая делает из расходящегося пучка эллиптической формы – коллимированный пучок света требуемого диаметра. Второй элемент преобразует эллиптический пучок света с распределением интенсивности по закону Гаусса в пучок круглой формы с равномерным распределением интенсивности. Последний элемент – цилиндрическая линза, которая фокусирует лазерное излучение по «короткой» оси лазера с требуемым апертурным углом в плоскость модулятора в виде линии шириной в несколько мкм. Фокусирующий элемент имеет подвижку для настройки на плоскость модулятора.

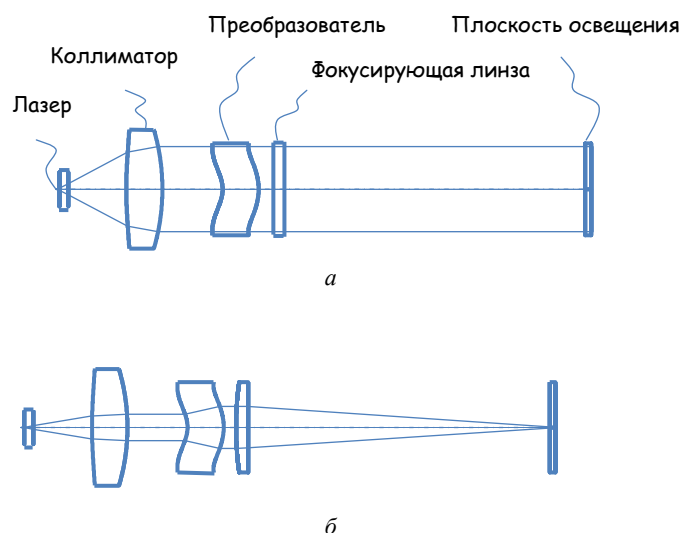


РИС. 2.8 ФОРМИРОВАТЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА
a – в плоскости YOZ; *б* – в плоскости XOZ

2.6 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМИ ВЫХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ УГЛА РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

Обычно в большинстве осветительных оптических систем, в том числе и в проекционных дисплеях, для получения коллимированного света с требуемым диаметром выходного пучка используется одиночная линза с постоянным фокусом. Однако на практике лазерные диоды и светоизлучающие диоды имеют разные углы расходимости излучения по осям. Поэтому использование одиночной коллимирующей линзы может быть недостаточно эффективно для некоторых устройств.

Помимо этого, в спецификации на источник света производителем лазерных диодов указываются допустимые отклонения углов расходимости, которые могут достигать нескольких градусов от источника к источнику и в зависимости от рабочей температуры, а это влечёт за собой значительные потери света в устройстве.

Чтобы этого не происходило целесообразно применить систему с переменными выходными характеристиками, в которой можно было бы плавно компенсировать отклонения углов расходимости или требуемого выходного диаметра в широких пределах. В некоторых случаях необходимо обеспечить достаточно большие перепады угла расходимости – 4 крата и более.

Автором в работе [84] впервые была предложена компактная оптическая система для минипроектора, позволяющая компенсировать изменение угла расходимости лазера.

Эта система представлена на рис.2.9 и состоит из линзы коллиматора и 3х-линзового телеконвертера. Телеконвертер с внутренней фокусировкой имеет простую последовательно симметричную конструкцию, в которой наружные линзы – плосковыпуклые, а внутренняя – двояковогнутая. Первая и вторая линзы телеконвертера имеют возможность двигаться, а наружная линза неподвижна. При этом полная длина телеконвертера (расстояние от первой поверхности до последней поверхности) остаётся неизменной.

Применение флинтового стекла с высоким показателем преломления ($n_d > 1,8$) во второй линзе позволяет получить очень компактный конвертер – длиной <10мм. В качестве линзы коллиматора может быть использована асферическая линза, подобранная из коммерческих каталогов (Thorlabs, Melis Griot и др.)

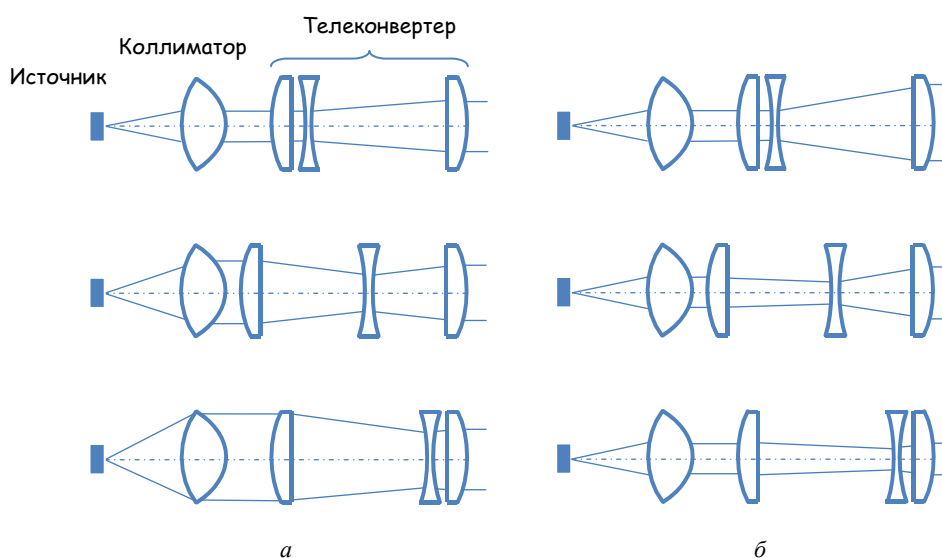


Рис. 2.9 ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

КОМПЕНСАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРА

a – при фиксированном выходном диаметре пучка; *б* – при фиксированном угле расходимости лазера

На рис.2.9а показан вид оптической системы, когда при изменении угла расходимости излучателя на входе оптической системы – выходной диаметр пучка не изменяется. На рис.2.9б справа показан вид оптической системы в случае, когда необходимо изменять выходной диаметр пучка осветительной системы при постоянном угле расходимости излучателя на входе.

В табл.2.8 приведены конструктивные параметры, в табл.2.9 – переменные параметры оптической системы для компенсации входного угла излучения.

Т а б л и ц а 2.8

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d
1	∞	0,25	1	-
2	∞	0,25	ВК7	-
3	∞	0,5	1	-
4	∞	0,82	1	-
5	3,205	3,19	СО550	-
6	-2,748	d6	1	-
7	8,935	1,1	1,516	64,2
8	∞	d8	1	-
9	-5,583	1,0	1,516	64,2
10	5,583	d10	1	-
11	∞	1,1	1,516	64,2
12	-8,935	-	1	-

Т а б л и ц а 2.9

ПАРАМЕТР	Поз 1	Поз 2	Поз 3
Входной угол, градус	13	17	22
d6	2,83	0,20	2,64
d8	0,54	5,82	8,47
d10	8,43	5,81	0,69
Выходной диаметр, мм	1,6	1,6	1,6
Увеличение, крат	0,5	1,0	2,0

2.7 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ - РАСШИРИТЕЛЯ ПУЧКА С ПЕРЕМЕННЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ

В осветительных системах лазерных дисплеев часто используется расширитель пучка с фиксированным увеличением для получения нужного диаметра выходного пучка. Однако, на практике диаметр выходного пучка лазерного диода может изменяться в широких пределах и необходимо применение расширителя пучка с переменным увеличением.

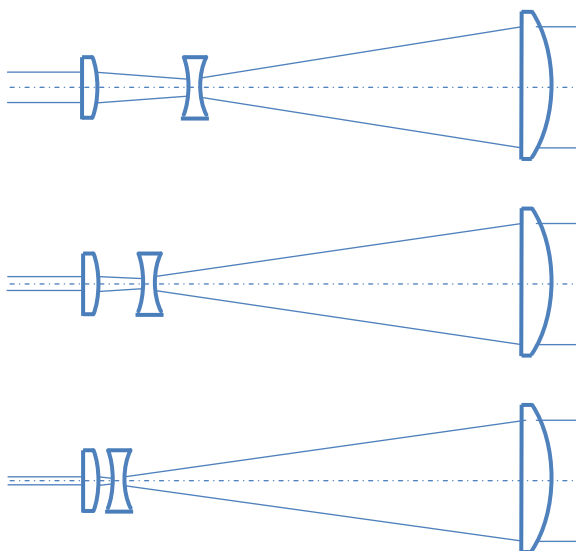


Рис. 2.10 РАСШИРИТЕЛЬ ПУЧКА

На рис.2.10 представлена конструкция расширителя пучка с внутренней фокусировкой, предложенная автором в [67]. С помощью такого расширителя можно непрерывно компенсировать изменение диаметра входного коллимированного пучка (или близко к коллимированному) при неизменном расчётном значении диаметра коллимированного пучка на выходе оптической системы.

Расширитель, построенный по схеме телескопа Галилея, состоит из 3х элементов и обеспечивает 2х-кратное изменение диаметра входного пучка, при этом диапазон увеличения (отношение диаметра выходного пучка к диаметру входного пучка) составляет от 10 до 20 крат.

Такой расширитель может применяться для зелёных лазерных диодов, имеющих малую расходимость излучения и диаметр выходного пучка 100÷200 мкм. Отличительной особенностью предлагаемого расширителя является его простота и компактность.

Подвижными являются два передних элемента, причём минимальный шаг подвижки элементов подобран оптимальным (порядка десятых долей мм), что немаловажно для адаптации к существующим шаговым двигателям. Воздушный промежуток между подвижной и выходной линзой может быть использован для решения задачи миниатюризации осветительного модуля при применении дополнительных зеркальных или призматических элементов.

В табл.2.10 приведены конструктивные параметры, в табл.2.11 – переменные параметры расширителя пучка.

Т а б л и ц а 2.10

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d
1	∞	5	1	-
2	2,546	0,5	1,516	64,2
3	-1,0	d3	1	-
4	1,0	0,5	1,923	20,9
5	-1,0	d5	1	-
6	-234,8	1,0	1,516	64,2
7	-10,08	5,0	1	-
8	∞	-	-	-

Т а б л и ц а 2.11

ПАРАМЕТР	Поз 1	Поз 2	Поз 3
Входной диаметр, мм	0,1	0,15	0,2
d3	0,1	0,308	0,419
d5	18,663	18,476	18,344
Выходной диаметр, мм	2,0	2,0	2,0
Увеличение, крат	20	13,3	10

В некоторых случаях задача реформирования лазерного излучения сводится к преобразованию эллиптического пучка в пучок круглой формы. Автором в работе [83] была предложена простая оптическая система для лазерных диодов, у которых соотношение углов расходимости по «быстрой» и «короткой» оси невелико и составляет $1:1,5 \div 1:2$.

2.8 МЕТОДЫ МИНИАТЮРИЗАЦИИ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

На рис.2.11 представлена схема преобразования излучения в осветительной системе лазерного проектора.

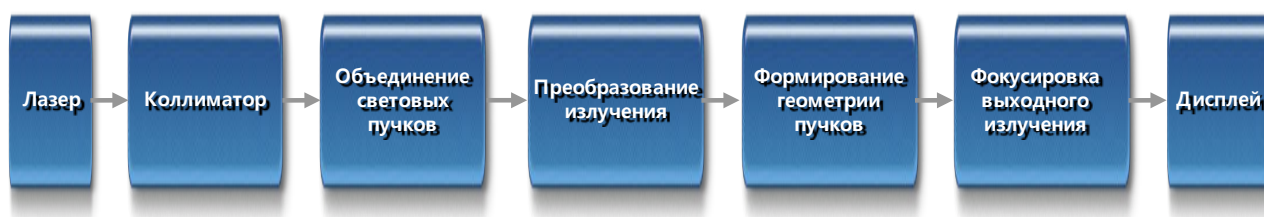


Рис. 2.11 СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Схема отражает последовательность преобразования световых пучков при прохождении света от источника излучения до плоскости освещения. Как можно видеть из схемы, процесс преобразования излучения в осветительной системе проектора состоит из достаточно длинной цепочки различных функциональных элементов.

Выполнение нескольких функций преобразования света одним элементом позволяет повысить световую эффективность, существенно сократить размеры и стоимость осветительного модуля проектора.

Методы миниатюризации:

- разработка компактных оптических схем с рациональным применением асферических, дифракционных элементов для эффективной коррекции aberrаций;
- разработка комбинированных оптических узлов и 3x-мерное проектирование;
- разработка многофункциональных элементов для преобразования оптического излучения;
- разработка монолитных и планарных оптических элементов.

2.9 ЭЛЕМЕНТЫ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МИНИПРОЕКТОРА

2.9.1 РАСЧЁТ ЛИНЗЫ КОЛЛИМАТОРА ДЛЯ КРАСНОГО И СИНЕГО ЛАЗЕРА

Как известно, лазерный диод излучает расходящийся пучок света, причём с разными углами расходимости по так называемой "быстрой" (fast) оси θ_{\perp} и "короткой" (slow) оси θ_{\parallel} .

В спецификации лазерных диодов величины θ_{\perp} и θ_{\parallel} указаны в градусах и при расчёте коллиматора целесообразно использовать именно эти параметры в качестве исходных.

Однако, необходимо учитывать и множество других факторов, влияющих на расчёт линзы коллиматора. Такие как – конструкция диода (определяет минимальный передний отрезок линзы), углы расходимости (определяют светосилу), минимально допустимые радиус, диаметр, толщина линзы по оси и по краю (допуски на изготовление), углы падения и преломления на оптических поверхностях (эффективность), технологичность (стоимость), измерительные возможности (контроль выходных параметров) и др.

Обычно в качестве коллиматора применяют одиночную асферическую линзу (рис.2.12).

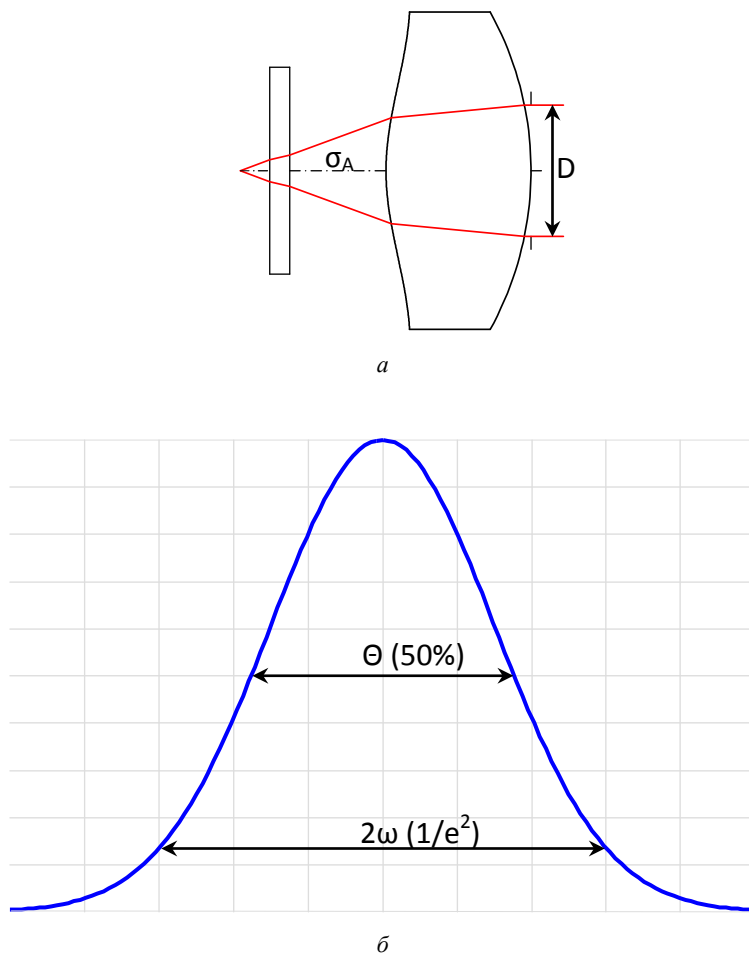


Рис. 2.12: а –линза коллиматора;
б – кривая распределения интенсивности лазера

Из рис.2.12 по формулам вычисляется угол расходимости, апертурный угол и фокусное расстояние линзы:

$$\omega = 0,849 \times \theta, \quad \sigma_A = \omega, \quad f' = D / (2 \times \operatorname{tg} \omega), \quad (2.8)$$

где θ – полный угол расходимости лазерного диода по уровню интенсивности 50%,
 ω – половинный угол расходимости лазерного диода по уровню интенсивности $1/e^2$,

σ_A – апертурный угол в пространстве предметов, D – диаметр входного зрачка, f' – фокусное расстояние.

Качество расчёта линзы коллиматора принято оценивать по величине ошибки волнового фронта Δw в длинах волн или по величине среднеквадратической ошибки RMS в мкм.

В авторской работе [52] приведены данные расчёта асферических линз коллиматоров и их оптические характеристики.

Пример расчёта линзы коллиматора красного лазера:

длина волны излучения $\lambda=640$ нм,

угол расходимости $\theta_{\perp}=18,45^{\circ}$,

диаметр входного зрачка $D=1,6$ мм.

Согласно формулам (2.8): $\omega = 0,849 \times 18,45^{\circ} = 15,66^{\circ}$;

$$\sin \sigma_A = \sin 15,66^{\circ} = 0,27 ;$$

$$f' = 1,6 / (2 \times \operatorname{tg} 15,66^{\circ}) = 2,853 \text{ мм.}$$

Конструктивные параметры линзы коллиматора красного лазера приведены в табл.2.12.

Т а б л и ц а 2.12

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коэффициенты асферики
Объект	-	∞	1	-	
АД	2,604	1,8	1,923	20,9	$k=-0,671$
3	∞	0,998	1	-	
4	∞	0,5	1	-	
5	∞	0,25	1,517	64,2	
6	∞	0,25	1	-	
Лазер	-	-	-	-	

Пример расчёта линзы коллиматора синего лазера:

длина волны излучения $\lambda=445$ нм,

угол расходимости $\theta_{\perp}=33,4^{\circ}$,

диаметр входного зрачка $D=2,6$ мм.

Согласно формулам (2.8): $\omega = 0,849 \times 33,4^{\circ} = 28,36^{\circ}$;

$$\sin \sigma_A = \sin 28,36^{\circ} = 0,475 ;$$

$$f' = 2,6 / (2 \times \operatorname{tg} 28,36^{\circ}) = 2,408 \text{ мм.}$$

Конструктивные параметры линзы коллиматора синего лазера приведены в табл.2.13.

Таблица 2.13

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коэффициенты асферики
Объект	-	∞	1	-	
АД	4,215	1,75	1,923	20,9	$A_1=9,801E-03$ $\alpha_2=4,1341E-04$
3	-4,215	1	1	-	$A_1=9,801E-03$ $\alpha_2=-4,1341E-04$
4	∞	0,5	1	-	
5	∞	0,25	1,517	64,2	
6	∞	0,25	1	-	
Лазер	-	-	-	-	

На рис.2.13 приведены графики ошибки волнового фронта линз красного и синего коллиматоров. На графиках обозначены: Δw – ошибка волнового фронта в длинах волн, p – координата зрачка в относительных единицах.

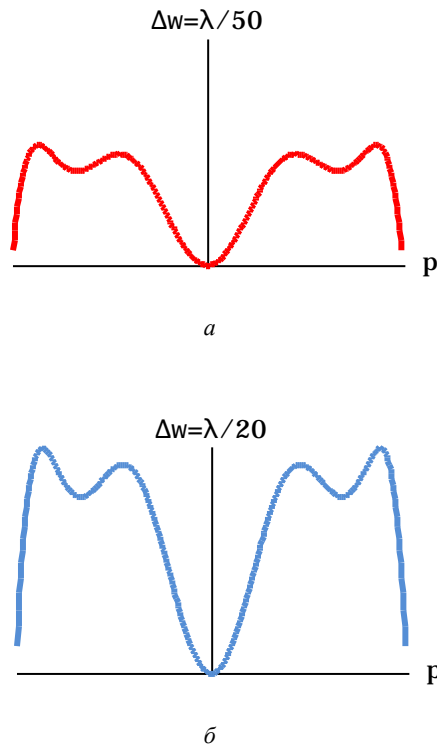


Рис. 2.13 Графики ошибки волнового фронта:
 a – линза красного лазера, b – линза синего лазера.

Как следует из графиков, расчётное значение ошибки волнового фронта линзы красного лазера составляет $\sim \lambda/100$, а линзы синего лазера $\sim \lambda/20$. Такое различие связано прежде всего с тем, что числовая апертура линзы синего лазера почти вдвое превышает числовую апертуру линзы красного лазера. При этом асферическая линза синего лазера – симметричная, что технологически более предпочтительно для изготовления и контроля.

Обе линзы имеют одинаковые наружные диаметры 4 мм, передний отрезок 2 мм и толщину по краю 1 мм, что является предельно допустимым для массового производства.

2.9.2 КОМПАКТНАЯ СХЕМА КОЛЛИМАТОРА ДЛЯ ЗЕЛЁНОГО ЛАЗЕРА С ФУНКЦИЕЙ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДИМОСТЬЮ ПУЧКА И ЕГО ДИАМЕТРА

Зелёный лазерный диод излучает свет с малым углом расходимости $5\div 10$ мрд и поэтому расчёт коллиматора ведётся иначе. Поскольку диаметр пучка зелёного лазера в области перетяжки составляет $100\div 200$ мкм, а диагональ матрицы дисплея – порядка нескольких миллиметров, то главной задачей зелёного коллиматора является формирование коллимированного пучка с заданным выходным диаметром. Для дисплея с диагональю 8мм увеличение телескопа должно быть $40\div 80^x$, а его длина будет определяться предельно достижимым значением радиуса вогнутой поверхности окулярной линзы. Применение каскадной схемы, состоящей из двух телескопов, с разбиением диапазона увеличения на два (например: $16\times 5=80^x$) более предпочтительно с точки зрения изготовления, сборки и юстировки.

Автором была предложена компактная оптическая схема коллиматора для зелёного лазера с малой расходимостью, подобная системе телескопа Галилея.

На рис.2.14 показана оптическая схема коллиматора с 16^x увеличением, состоящая из 3х линз.

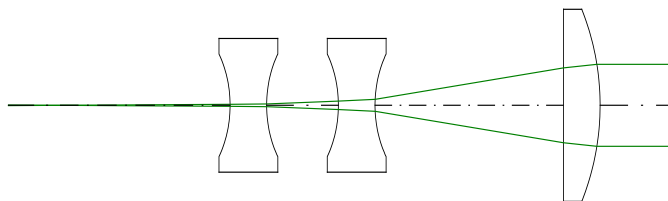


Рис. 2.14 Коллиматор зелёного лазера с малой расходимостью

Поскольку габаритные размеры коллиматора определяются минимальным значением (1,8 мм) вогнутых радиусов линз окуляра, то окуляр было предложено выполнить из двух одинаковых двояковогнутых симметричных линз. Кроме того, в такой схеме перемещение внутренней линзы окуляра позволяет управлять расходимостью и диаметром выходного пучка. Для обеспечения хорошо коллимированного пучка диаметром 1,6 мм при минимальных габаритах коллиматора (<10 мм) последняя поверхность объектива выполнена асферической.

На рис.2.15 показана 2х-линзовая телескопическая система с 5^x увеличением, которая преобразует входной коллимированный пучок диаметром 1,6 мм в коллимированный пучок диаметром 8 мм.

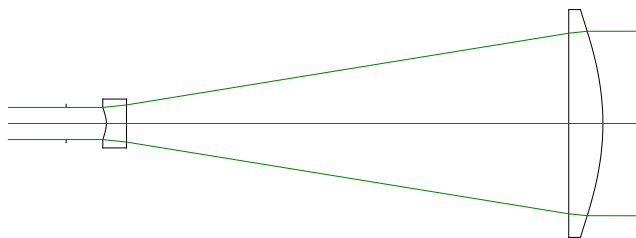


Рис. 2.15 Телескопическая система с 5-кратным увеличением

2.9.3 МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ УГЛА РАСХОДИМОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

Известно, что изготовление двояковыпуклых сферических линз с коротким фокусным расстоянием (< 3 мм) представляет большие технологические трудности. Тогда как линзы в форме миниатюрных стеклянных шариков широко применяются на практике, в частности, в лазерных приборах для ввода излучения в оптическое волокно. В настоящее время предлагается широкий выбор линз в форме шара с диаметром от 0,5 до 10 мм.

В работе [44] автором было предложено использовать миниатюрный стеклянный шарик для увеличения угла расходимости зелёного лазера, что позволило дополнительно сократить размеры осветительной системы. Поскольку ставилась задача сделать предварительную оценку эффективности применения короткофокусного стеклянного шарика для увеличения угла расходимости зелёного лазера, то в качестве расчётной была выбрана модель с точечным источником света, приведённая на рис.2.16.

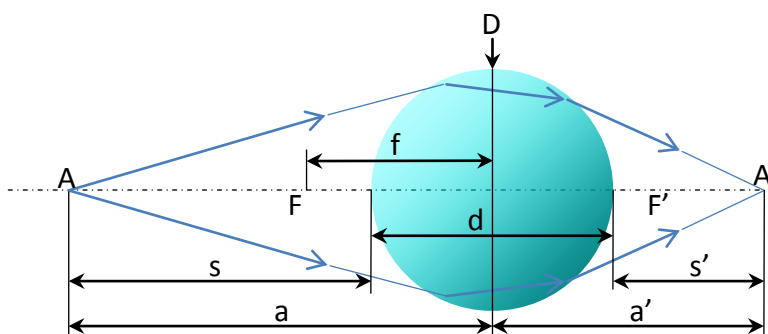


Рис. 2.16 УВЕЛИЧЕНИЕ УГЛА РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРА

По формуле линзы

$$\frac{1}{f'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2}{n} \frac{d}{r_1 r_2} \quad (2.9)$$

После подстановки в (2.9) значений $r_1 = r_2 = r = d/2$ получим следующие выражения для стеклянного шарика:

$$f' = \frac{nr}{2(n-1)}; \quad s_F = \frac{r(2-n)}{2(n-1)}, \quad (2.10)$$

где f' – фокусное расстояние, s_F – передний рабочий отрезок, r – радиус, n – показатель преломления.

Из рис.2.16 следует:

$$a = s + r; \quad a' = s' + r; \quad \gamma = \frac{a}{a'}, \quad (2.11)$$

где a – расстояние от передней главной точки до излучателя, a' – расстояние от задней главной точки до изображения излучателя, s – передний отрезок, s' – задний отрезок γ – угловое увеличение.

Для практических расчётов удобно выразить значение s' через известные величины s и r .

Решим систему уравнений, используя формулу Ньютона:

$$\begin{cases} z = s - s_F \\ z' = s' - s_F \\ zz' = f'^2 \end{cases} \quad (2.12)$$

После преобразований получаем следующие выражения:

$$s' = \frac{f'^2}{s - s_F} + s_F \Rightarrow s' = \frac{\left[\frac{nr}{2(n-1)} \right]^2}{s - \frac{r(2-n)}{2(n-1)}} + \frac{r(2-n)}{2(n-1)} \quad (2.13)$$

Пример расчёта увеличения угла расходимости зелёного лазера.

лазер: $\lambda=532$ нм, $s=10$ мм;

стеклянный шарик: $r=1$ мм, стекло К8, $n=1,5$.

$$s' = \frac{\left[\frac{1,5 \times 1}{2 \times (1,5 - 1)} \right]^2}{10 - \frac{1 \times (2 - 1,5)}{2(1,5 - 1)}} + \frac{1 \times (2 - 1,5)}{2 \times (1,5 - 1)} = 0,737 \text{ мм}$$

$$a = 10 + 1 = 11 \text{ мм} \quad ; \quad a' = 0,737 + 1 = 1,737 \text{ мм} \quad ; \quad \gamma = \frac{a}{a'} = \frac{11}{1,737} = 6,33 \times$$

2.9.4 КОМПАКТНАЯ ОБОРАЧИВАЮЩАЯ СИСТЕМА

При создании минипроектора с лазерными источниками света часто возникает необходимость уменьшения такого нежелательного эффекта как спекл – зернистость изображения на экране, которая является следствием высокой когерентности лазерного излучения. Существуют различные методы подавления лазерных спеклов. Для их реализации почти всегда требуется иметь дополнительную промежуточную плоскость изображения для установки специальных элементов или фильтров.

Автором в работе [70] была предложена телецентрическая оборачивающая система для формирования промежуточного изображения, в которой в плоскости апертурной диафрагмы установлено плоское зеркало. Применение такого решения «с двойным прохождением лучей» позволяет в два раза уменьшить длину системы по сравнению с традиционной оборачивающей системой, состоящей из двух объективов, показанной на рис.2.20а.

На рис. 2.20б и 2.20в показан вид оборачивающей системы, которая нашла применение в миниатюрном проекторе со сканированием лазерного луча.

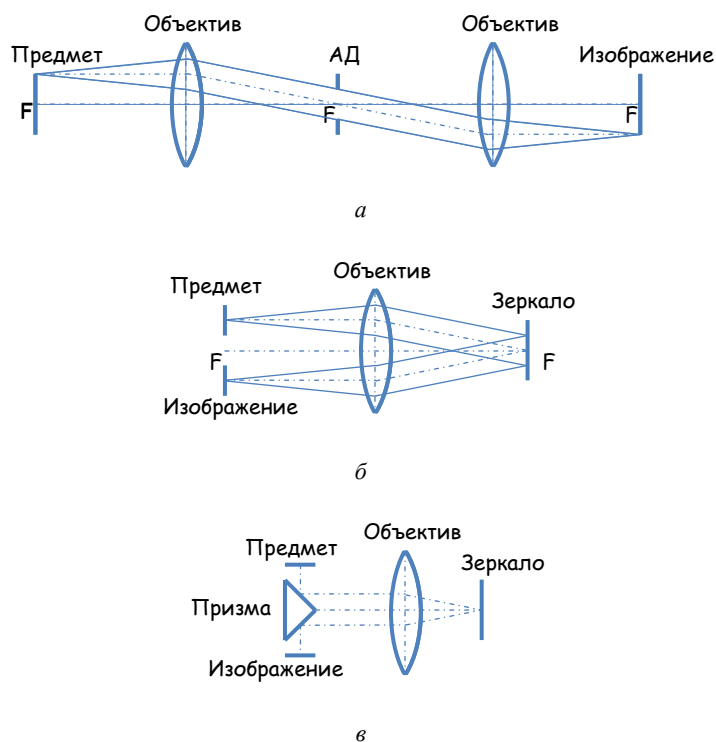


Рис. 2.20 ОБОРАЧИВАЮЩАЯ СИСТЕМА:
а – двухлинзовая; б – с зеркалом; в – с призмой

2.10 МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

2.10.1 РАСЧЁТ КОЛЛИМАТОРА С ПРИЗМОЙ ДЛЯ ДВУХВОЛНОВОГО ЛАЗЕРА

В работе [30] автором была предложена компактная осветительная система с телецентрическим ходом главного луча. Эта система была применена для двухволнового лазерного диода [100], чип которого включает два эмиттера – красного и синего лазера, смещённых по геометрическим осям. Излучение красного и синего лазеров последовательно коллимируется общей линзой коллиматора и затем, преломившись на входной грани анаморфотной призмы, объединяется в единый пучок круглого сечения.

На рис.2.17 обозначены основные параметры, необходимые для расчёта.

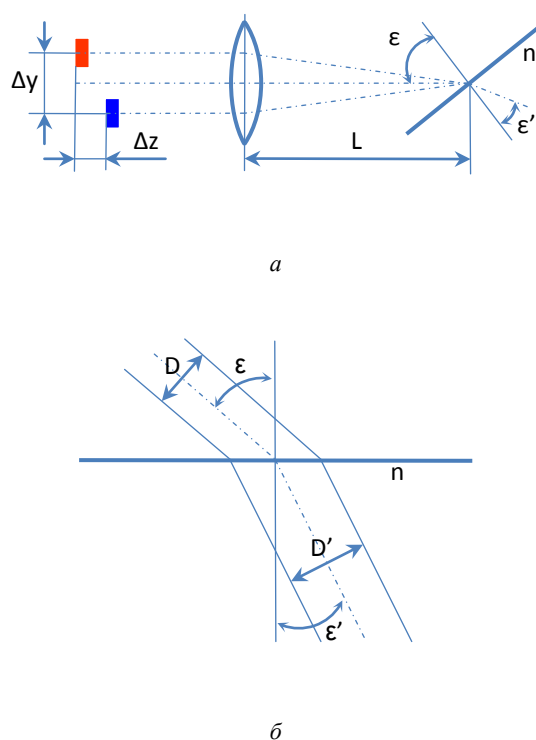


Рис. 2.17 СХЕМА РАСЧЁТА КОЛЛИМАТОРА С ПРИЗМОЙ

Телецентрический ход главного луча в коллиматоре позволяет, во-первых, обеспечить соосность и совмещение пучков красного и синего лазера на выходе призмы, а во-вторых – уменьшает технологические требования к точности установки параметра Δz – расстояния между излучателями.

Из рис.2.17 в первом приближении напишем условие телецентрического хода главного луча в коллиматоре

$$L=f', \quad (2.14)$$

где L – расстояние от линзы коллиматора до призмы, f' – фокусное расстояние коллиматора.

Согласно закону Снеллиуса

$$\sin \varepsilon = n \times \sin \varepsilon', \quad (2.15)$$

где ε – угол падения луча, n – показатель преломления стекла призмы, ε' – угол преломления луча.

Соосность коллимированных пучков красного и синего лазера на выходе призмы будет выполняться при условии

$$\sin \varepsilon'_R = \sin \varepsilon'_B, \quad (2.16)$$

где ε'_R – угол преломления луча красного цвета, ε'_B – угол преломления луча синего цвета.

Из рис.2.17, используя выражения 2.15-2.16, для выбранного 2-х волнового лазерного диода с известным параметром Δy и призмы с заданным углом при вершине ε' и показателем преломления n можно вычислить требуемое фокусное расстояние линзы коллиматора:

$$f' = \frac{\Delta y}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\varepsilon'_B - \varepsilon'_R}{2}\right)}, \quad (2.17)$$

где Δy – расстояние между излучателями 2х-волнового лазерного диода, ε'_R – угол падения луча красного цвета, ε'_B – угол падения луча синего цвета.

Из рис.2.17 вычислим коэффициент увеличения, который определяет степень исправления эллиптичности входного излучения:

$$m = \frac{D'}{D} = \frac{\cos \varepsilon'}{\cos \varepsilon} \quad (2.18)$$

Пример расчёта коллиматора с призмой:

угол преломления луча (угол при вершине призмы) $\varepsilon' = 30^\circ$, стекло – SF11,

длина волны красного излучателя $\lambda_R = 635$ нм,

длина волны синего излучателя $\lambda_B = 440$ нм,

расстояние между излучателями $\Delta y = 130$ мкм.

По формулам 2.15-2.18 определим параметры коллиматора с призмой:

$$\varepsilon'_R = \arcsin(n_{635} \times \sin 30^\circ) = \arcsin(1,7783 \times 0,5) = 62,77^\circ;$$

$$\varepsilon'_B = \arcsin(n_{440} \times \sin 30^\circ) = \arcsin(1,8234 \times 0,5) = 65,74^\circ;$$

$$f' = \frac{\Delta y}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\varepsilon'_B - \varepsilon'_R}{2}\right)} = \frac{0,13}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{65,74^\circ - 62,77^\circ}{2}\right)} = 2,51 \text{ мм};$$

$$m_R = \frac{\cos \varepsilon'}{\cos \varepsilon'_R} = \frac{\cos 30^\circ}{\cos 62,77^\circ} = \frac{0,866}{0,458} = 1,89^\times;$$

$$m_B = \frac{\cos \varepsilon'}{\cos \varepsilon'_B} = \frac{\cos 30^\circ}{\cos 65,74^\circ} = \frac{0,866}{0,411} = 2,11^\times.$$

2.10.2 Блок КОЛЛИМАТОРОВ – ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

На рис.2.18 представлена многофункциональная осветительная система, в которой излучение трёх лазерных диодов последовательно коллимируется, реформируется из эллипса в круг, а затем смешивается в единый пучок белого цвета. Эта оптическая система, названная блоком коллиматоров, описана в работе [30]. Блок коллиматоров состоит из 2х-волнового лазерного диода с длиной волны излучения 440 нм и 635 нм, зелёного лазерного диода с длиной волны излучения 532 нм, двух коллиматоров и анаморфотной призмы.

Пример расчёта 2х-волнового коллиматора с призмой был приведён в п.2.10.1.

Анаморфотная призма имеет три рабочие поверхности, обозначенные на рис.2.18. Коллимированный пучок зелёного лазера входит в призму через 1-ю поверхность, отражается от 3-ей поверхности, а при отражении от 2-ой поверхности призмы смешивается с пучками красного и синего цвета. В свою очередь, коллимированные пучки красного и синего лазера входят в призму под расчётными углами через 2-ую поверхность. После преломления оба пучка реформируются из эллипса в круг и становятся соосными. Таким образом, из призмы выходит коллимированный пучок белого цвета, имеющего в сечении форму круга, причём ось пучка перпендикулярна 3-ей поверхности призмы.

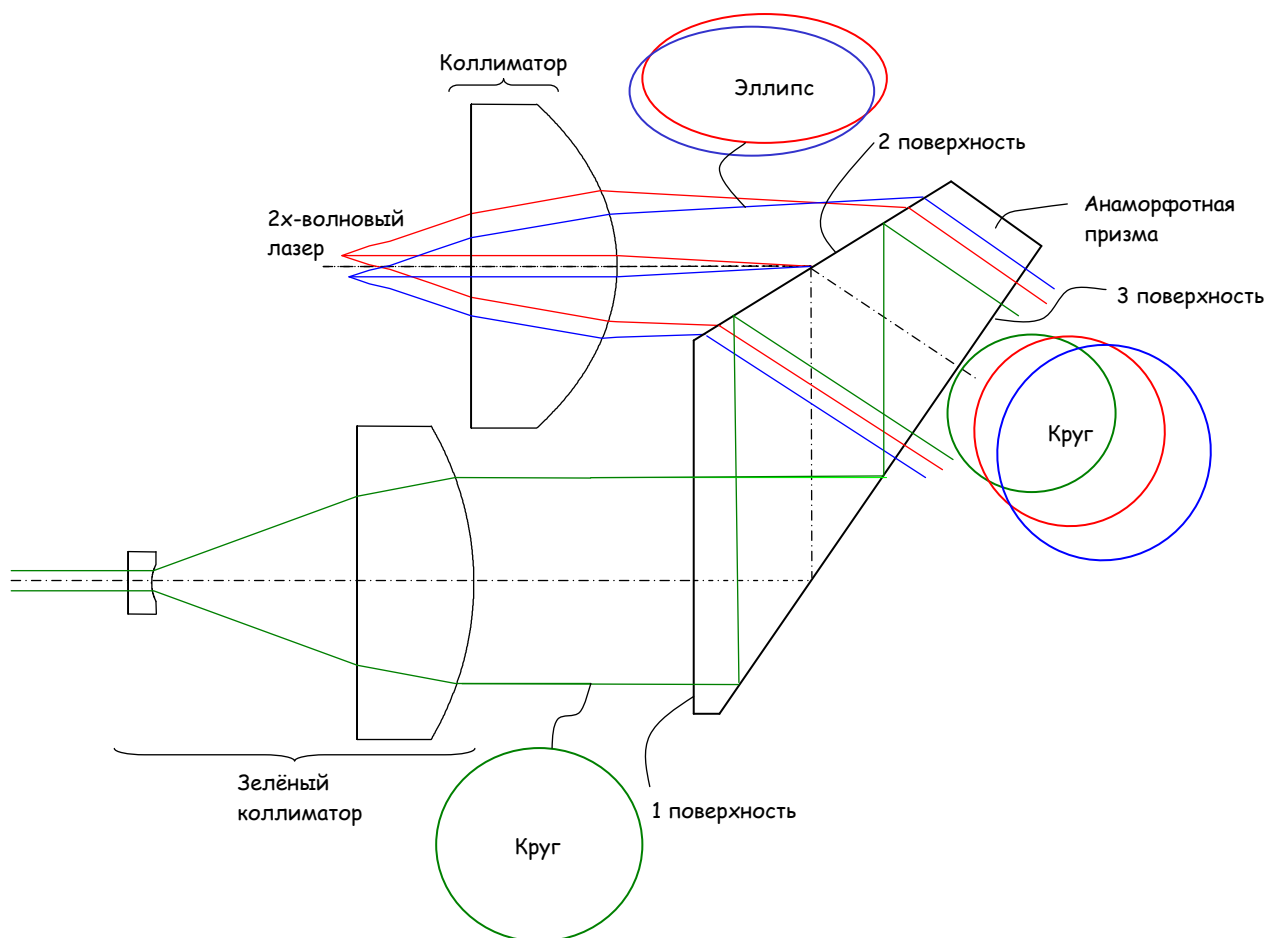


РИС. 2.18 БЛОК КОЛЛИМАТОРОВ

Применение 2х-волнового лазерного диода, короткофокусных линз (в зелёном коллиматоре, например, величина вогнутого радиуса составляет всего 0,3 мм) и анаморфотной призмы, позволило существенно сократить количество оптических элементов и размеры оптической системы $\sim 6 \times 8$ мм (в плоскости рис.2.18) при диаметре выходного пучка 1,2 мм.

Для красного и синего лазера автором был рассчитан коллиматор с телецентрическим ходом главного луча. При расчёте необходимо было выполнить жёсткие требования к величине ошибки волнового фронта одновременно для двух цветов, выдержать расстояние до призмы и с учётом дисперсии в призме обеспечить соосность и совмещение пучков на выходе.

2.10.3 ГЕНЕРАТОР ЛИНИИ, ЕГО ОПТИМАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ

Оптическая схема, которая формирует из коллимированного входного пучка круглого сечения – линию на выходе, представлена на рис.2.19. Эта система образована на основе 5^х телескопа (рис.2.15), в который интегрирована цилиндрическая линза для фокусировки пучка в плоскости одномерного оптического модулятора.

Она также является многофункциональной, т.к. в ней последовательно происходит расширение пучка, преобразование пучка с распределением Гаусса – в равномерное и фокусировка пучка. В авторской работе [28] приведены примеры расчёта и выходные характеристики «генератора линии».

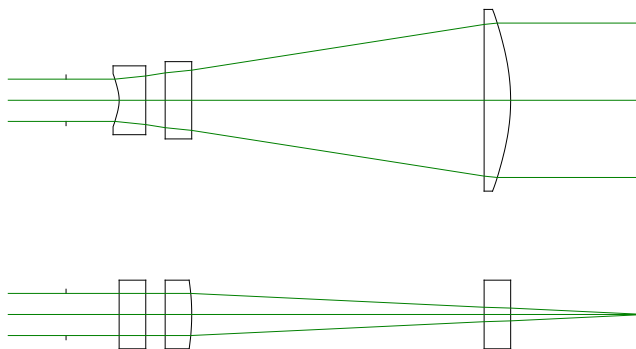


Рис. 2.19 «ГЕНЕРАТОР ЛИНИИ»

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработанные оригинальные лазерные осветительные системы: преобразователь лазерного пучка, формирователь лазерного излучения, компенсатор угла излучения, расширитель пучка обеспечивают равномерность и требуемую геометрическую форму лазерного пучка, компенсацию выходного угла расходимости лазера и фокусировку излучения.

2. Для преобразования оптического излучения в минипроекторах могут использоваться многофункциональные, монолитные и планарные элементы, применение которых позволяет существенно сократить размеры оптического модуля, повысить световую эффективность и уменьшить стоимость.

3. Разработанная методика расчёта оптических систем позволяет осуществлять инженерный расчет минипроекторов в соответствии с заданной спецификацией (исходными данными): типом и принципом действия оптического модулятора (микродисплея), типом выбранного источника света, размерами и форматом экрана, требуемой яркостью и равномерностью освещенности изображения, разрешающей способностью объектива, типом и характеристиками сканирующего устройства, габаритами разрабатываемого минипроектора.

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТИВЫ МИНИПРОЕКТОРОВ

3.1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТИВОВ СОВРЕМЕННЫХ МИНИПРОЕКТОРОВ

В табл.3.1 приведены основные характеристики объективов современных минипроекторов.

Таблица 3.1

Характеристика	Величина
Фокусное расстояние	2,5÷25 мм
Относительное отверстие	1:2÷1:5
Угловое поле	25÷130°
Разрешение	25÷100 штр/мм
Дисторсия	< 0,5÷5%
Диагональ экрана	10÷80"
Проекционное расстояние	0,1÷5 м

Как видно из табл.3.1, диапазон характеристик объективов достаточно широкий и определяется типом минипроектора. Одновременно с тенденцией уменьшения портативных электронных устройств уменьшаются и размеры встраиваемых оптических модулей: камер мобильных телефонов и минипроекторов. При этом с каждым годом растут и требования, предъявляемые к качеству изображения минипроекторов, что связано с постоянным уменьшением размера пикселя в оптических модуляторах – микродисплеях.

РАЗРЕШЕНИЕ

Предельное разрешение объектива ограничено дифракционным критерием Релея

$$x = 1,22\lambda \frac{f'}{D} \quad (3.1)$$

где x – минимальный размер пикселя в мкм, f'/D – диафрагменное число и λ – рабочая длина волны в мкм.

С другой стороны, требуемое разрешение объектива для заданного размера пикселя можно вычислить по формуле

$$N = \frac{1}{2x} \quad (3.2)$$

где N – пространственная частота в штр/мм, x – размер пикселя в мкм.

Исходя из формулы (3.1) и табл.3.1, дифракционный предел $x=1,35÷3,35$ мкм, а для современных микродисплеев с размером пикселей $x=5÷20$ мкм диапазон разрешения объективов по формуле (3.2) должен составлять $N=25÷100$ штр/мм.

3.2 МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОБЪЕКТИВА НА ОСНОВЕ ТИПОВОЙ СПЕЦИФИКАЦИИ МИНИПРОЕКТОРА

Исходя из известных параметров заданного микродисплея, т.е его формата (количества пикселей), размера пикселя, размера изображения и требуемой яркости на экране можно рассчитать основные характеристики объектива: фокусное расстояние, угловое поле, проекционное расстояние, увеличение и разрешение на экране.

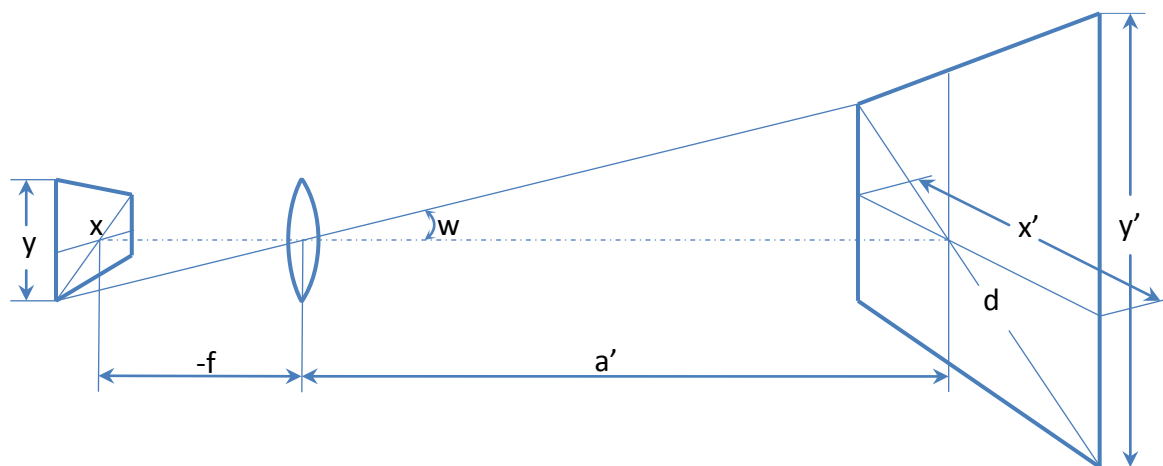


Рис. 3.1 РАСЧЁТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТИВА

На рис.3.1 обозначены основные параметры для расчёта объектива:

- y – высота матрицы дисплея,
- x – ширина матрицы дисплея,
- f' – фокусное расстояние объектива,
- w – половина углового поля объектива,
- a' – проекционное расстояние,
- d – диагональ экрана,
- y' – высота экрана,
- x' – ширина экрана.

В табл.3.2 приводится типовая спецификация минипроектора.

Таблица 3.2

Параметр	Значение
Разрешение матрицы	VGA
Формат матрицы	4:3
Размер пикселя	16,6 μm
Диагональ экрана	10"
Проекционное расстояние	400 мм
Световой поток	10 люмен
Дисторсия	< 0,5%

Задаваясь диагональю экрана d , по формулам 3.3-3.4 определим ширину экрана x' и высоту экрана y' :

$$\begin{cases} d^2 = x'^2 + y'^2 \\ \frac{x'}{y'} = k \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} x' = \frac{d^2}{\sqrt{\frac{1}{k^2} + 1}} \\ y' = \frac{d^2}{\sqrt{k^2 + 1}} \end{cases} \quad (3.4)$$

где k – коэффициент, определяющий формат матрицы дисплея.

Для минипроекторов k может принимать значения 4:3 или 16:9.

Вычислим размеры сторон экрана для минипроектора с диагональю экрана 10".

Для $k=4:3 \Rightarrow x' = 8$ дюймов; $y' = 6$ дюймов

Для $k=16:9 \Rightarrow x' = 12,2$ дюйма $y' = 6,9$ дюйма

По заданому разрешению выбранной матрицы 640×480 (VGA) и размеру пикселя 16,6µm определяем высоту матрицы дисплея:

$$y = 480 \times 0,0166 = 8 \text{ мм}$$

Из рис. 3.1 следует:

$$\frac{y}{f'} = \frac{y'}{a'} \quad (3.5)$$

$$f' = a' \frac{y}{y'} \quad (3.6)$$

Подставляя в формулу 3.6 значения параметров из табл.3.2 вычисляем фокусное расстояние объектива:

$$f' = 400 \frac{8}{6'' \times 25,4} = 21 \text{ мм}$$

3.3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПРОЕКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА С ВОЗДУШНЫМ ПРОМЕЖУТКОМ

Одна из наиболее простых схем, которая может быть рассмотрена при создании проекционного объектива - это схема объектива, состоящего из двух положительных компонентов, разделённых воздушным промежутком.

При расчёте оптических характеристик двухкомпонентного проекционного объектива могут быть применены известные формулы для двух бесконечно тонких компонентов, описанные в работах отечественных авторов В.Н.Чуриловского [6], Г.Г.Слюсарева [2-3], Н.П.Заказнова [5], Г.А.Можарова [1].

Двухкомпонентная оптическая система задана главными плоскостями $H_1H'_1$, и $H_2H'_2$, первый из компонентов имеет фокусное расстояние f'_1 и оптическую силу Φ_1 , а второй – фокусное расстояние f'_2 и оптическую силу Φ_2 , расстояние между компонентами равно d . (рис. 3.2)

Задача габаритного расчёта двухкомпонентного объектива состоит в определении его кардинальных отрезков: фокусных расстояний компонентов f'_1 , f'_2 , воздушного промежутка d и расстояний a_F , a'_F , определяющих положение переднего и заднего фокуса эквивалентной оптической системы объектива относительно её компонентов и установление взаимосвязи этих параметров.

Современные проекторы строятся на основе микродисплеев, эффективность работы которых существенно зависит от угла излучения (в излучающих микродисплеях LCD) или угла падения (в отражающих микродисплеях DMD). И чем угол излучения (падения) меньше, тем эффективность (яркость) микродисплея выше. Поэтому при расчёте проекционного объектива необходимо учитывать телецентричность хода главного луча в пространстве предметов (в прямом ходе), обеспечивающую максимальную эффективность работы микродисплея.

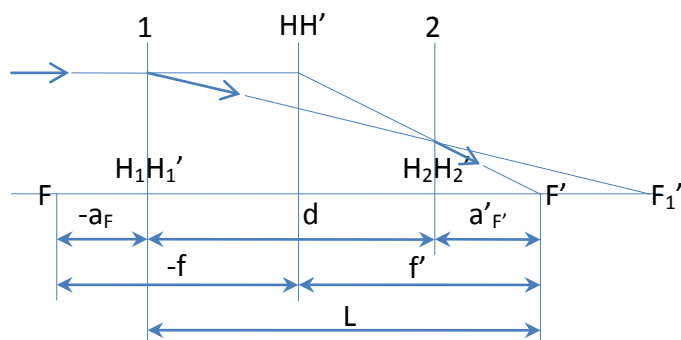


РИС. 3.2 СХЕМА РАСЧЁТА ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ОБЪЕКТИВА

Пользуясь обозначениями на рис.3.2, приведём основные формулы для расчёта двухкомпонентной оптической системы

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d \\ \Phi_1 &= \frac{1 - \Phi(L - d)}{d} \\ \Phi_2 &= \frac{\Phi L - 1}{\Phi d(L - d)} \\ a'_{F'} &= \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi} \\ L &= d + a'_{F'} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где Φ – оптическая сила объектива, Φ_1, Φ_2 – оптические силы компонентов, d – воздушный промежуток между компонентами, $a'_{F'}$ – расстояние от заднего фокуса эквивалентной оптической системы до второго компонента и L – длина объектива.

Очевидно, что условием минимальных габаритов объектива является минимальное значение L и, в частном случае, при $d=0$.

Однако, на практике d и $a'_{F'}$ не могут иметь нулевые значения, поскольку часто эти воздушные промежутки необходимы для установки дополнительных оптических элементов (зеркал, фильтров, оптических модуляторов).

Установим взаимосвязь кардинальных отрезков двухкомпонентного объектива и на основе этой взаимосвязи определим область их оптимальных значений.

После несложных преобразований формул (3.7) перейдём к выражениям, связывающим эквивалентное фокусное расстояние оптической системы f' , фокусные расстояния компонентов f'_1, f'_2 , воздушный промежуток d и расстояние $a'_{F'}$.

$$\left. \begin{aligned} f'_1 &= \frac{df'}{f' - a'_{F'}} \\ f'_2 &= \frac{da'_{F'}}{d + a'_{F'} - f'} \\ k &= \frac{f'_1}{f'_2} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

где k – отношение фокусных расстояний компонентов.

При совместном решении уравнений (3.8) получим квадратное уравнение относительно $a'_{F'}$:

$$ka'_{F'}^2 - f'a'_{F'}(k-1) + f'(d-f')=0 \quad (3.9)$$

Разделив левую часть уравнения (3.9) на f'^2 , получим

$$k \left(\frac{a'_{F'}}{f'} \right)^2 - \frac{f'}{f'} \frac{a'_{F'}}{f'} (k-1) + \frac{f'}{f'} \left(\frac{d}{f'} - \frac{f'}{f'} \right) = 0 \quad (3.10)$$

Введём обозначения:

$$\frac{a'_{F'}}{f'} = \bar{a}'_{F'}, \quad \frac{d}{f'} = \bar{d}, \quad \frac{f'}{f'} = \bar{f}' = 1$$

После подстановки в (3.10) будем иметь

$$k\bar{a}'_{F'}^2 - (k-1)\bar{a}'_{F'} + (\bar{d}-1)=0 \quad (3.11)$$

Решения квадратного уравнения позволяют установить область допустимых значений расстояния $\bar{a}'_{F'}$ при различных значениях k и \bar{d} .

$$\bar{a}'_{F'} = \pm \frac{(k-1) \pm \sqrt{(k-1)^2 - 4k(\bar{d}-1)}}{2k} \quad (3.12)$$

Для определения области допустимых значений $\bar{a}'_{F'}$, построим зависимость расстояния $\bar{a}'_{F'}$ от k при нормированных значениях $\bar{f}'=1$ и $\bar{d}=1$.

На рис.3.3 представлен график изменения $\bar{a}'_{F'}$ от k (при значениях $k>0$), представляющий собой гиперболу, имеющую две асимптоты – ось абсцисс и прямую, параллельную оси ординат и пересекающую ось абсцисс при значении +1.

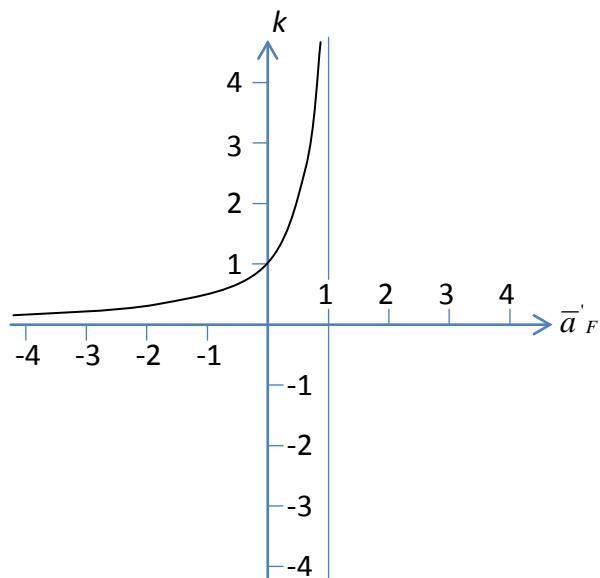


Рис. 3.3 Зависимость расстояния $\bar{a}'_{F'}$ от k .

Наибольший интерес для реализации оптической системы на практике представляет правая ветвь гиперболы, т.е. область значений при $0 < \bar{a}'_{F'} < 1$ и $0 < k < 4$.

Рассмотрим далее оптическую систему двухкомпонентного проекционного объектива, рассчитанного автором.

Исходные данные объектива:

$$f' = 20 \text{ мм}, f'_1 = 30 \text{ мм}, f'_2 = 20 \text{ мм}, d = 20 \text{ мм}.$$

Очевидно

$$k = 1,5, \quad \bar{d} = \frac{d}{f'} = \frac{20}{20} = 1$$

Подставим значения в формулу (3.12) и вычислим величину $\bar{a}'_{F'}$

$$\bar{a}'_{F'} = \pm \frac{(1,5 - 1) \pm \sqrt{(1,5 - 1)^2 - 4 \times 1,5 \times (1 - 1)}}{2 \times 1,5} = \frac{0,5 \pm 0,5}{3}$$

Выбирая знак плюс, имеем

$$\bar{a}'_{F'} = \frac{1}{3}$$

Переходя от приведённых величин к реальным, получим

$$a'_{F'} = \bar{a}'_{F'} \cdot f' = \frac{1}{3} \cdot 20 = 6,67 \text{ мм}$$

На рис.3.4 приведена схема двухкомпонентного объектива в обратном ходе с телецентрическим ходом главного луча в пространстве изображений (входной зрачок P совпадает с передним фокусом объектива F). Для уменьшения продольного размера объектива воздушный промежуток d может быть использован для установки ломающего зеркала под углом 45° к оптической оси.

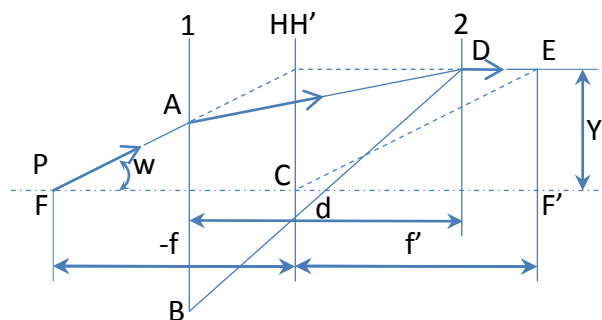


Рис. 3.4 СХЕМА ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ОБЪЕКТИВА
С ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКИМ ХОДОМ ГЛАВНОГО ЛУЧА

Определим зависимость воздушного промежутка d от фокусного расстояния f' и углового поля ω в проекционном объективе с телецентрическим ходом главного луча в пространстве изображений.

Рассмотрим случай, представленный на рис.3.4, когда плоскость зеркала проходит через середину воздушного промежутка d под углом 45° к оптической оси (прямая BD).

Из построений на рис.3.4 следует

$$\begin{aligned}\frac{2y'}{d} &= \operatorname{tg}45^\circ = 1; \\ \operatorname{tg}\omega &= \frac{y'}{f'}; \\ d &= 2f' \times \operatorname{tg}\omega.\end{aligned}\tag{3.13}$$

После подстановки выражения (3.13) в формулу (3.9) можно определить область допустимых значений параметров $a'_{F'}$ и k двухкомпонентного проекционного объектива с зеркалом при заданном угловом поле.

3.4 АБЕРРАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ОБЪЕКТИВА

Применим теорию aberrаций третьего порядка для оптической системы, состоящей из двух бесконечно тонких компонентов, разделённых воздушным промежутком.

Рассмотрим задачу исправления в оптической системе трёх монохроматических aberrаций: сферической aberrации, комы и астигматизма.

Выражения, определяющие коэффициенты aberrаций третьего порядка оптической системы, состоящей из двух тонких компонентов можно представить в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned}S_I &= h_1 P_1 + h_2 P_2; \\ S_{II} &= y_1 P_1 + y_2 P_2 + W_1 + W_2; \\ S_{III} &= \frac{y_1^2}{h_1} P_1 + \frac{y_2^2}{h_2} P_2 + 2 \frac{y_1}{h_1} W_1 + 2 \frac{y_2}{h_2} W_2 + \Phi_1 + \Phi_2.\end{aligned}\tag{3.14}$$

где S_I , S_{II} и S_{III} – суммы Зейделя, определяющие сферическую aberrацию, кому и астигматизм,

P , W – aberrационные параметры линз.

Для коррекции монохроматических aberrаций объектива необходимо выполнение условия $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$.

Запишем условия нормировки для 1-го и 2-го вспомогательных лучей.

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= 0; \quad \alpha_2 = \Phi_1; \quad \alpha_3 = 1; \\
h_1 &= f'; \quad h_2 = a'_F; \\
\beta_1 &= 1; \quad \beta_2 = \beta_1 + \frac{y_1}{f'}; \quad \beta_3 = 0;
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$y_1 = -a_F; \quad y_2 = -\beta_1 f' = -f'.$$

Подставляя в формулы (3.14) условия нормировки для приведённой оптической системы, приняв $h_1=f'=1$, получаем:

$$\begin{aligned}
S_I &= P_1 + h_2 P_2; \\
S_{II} &= y_1 P_1 + y_2 P_2 + W_1 + W_2; \\
S_{III} &= y_1^2 P_1 + \frac{y_2^2}{h_2} P_2 + 2y_1 W_1 + 2\frac{y_2}{h_2} W_2 + \alpha_2 + \frac{1-\alpha_2}{h_2}.
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Для решения задачи выразим параметры P и W через основные параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы [2]:

$$\begin{aligned}
P_i &= (\alpha'_i - \alpha_i)^3 P_i + 4\alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i)^2 W_i + \alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i) [2\alpha_i (2 + \pi) - \alpha'_i] \\
W_i &= (\alpha'_i - \alpha_i)^2 W_i + \alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i) (2 + \pi)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Для первого компонента $\alpha = 0, \alpha' = \alpha_2$, для второго $\alpha = \alpha_2, \alpha' = 1$, поэтому:

$$\begin{aligned}
P_1 &= \alpha_2^3 P_1; \quad W_1 = \alpha_2^2 W_1; \\
P_2 &= (1 - \alpha_2)^3 P_2 + 4\alpha_2 (1 - \alpha_2)^2 W_2 + \alpha_2 (1 - \alpha_2) [2\alpha_2 (2 + \pi) - 1]; \\
W_2 &= (1 - \alpha_2)^2 W_2 + \alpha_2 (1 - \alpha_2) (2 + \pi).
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Определим систему, удовлетворяющую условию $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$.

Для нахождения угла α_2 воспользуемся формулой [3]:

$$\beta_3 = \frac{h_2 + \alpha_2 + y_1 \alpha_2 h_2 - 1}{\alpha_2 h_2}$$

Из практических соображений задаём значение $y_1=0$ и $h_2 = \frac{1}{3}$.

Поскольку второй вспомогательный луч идёт из переднего фокуса системы (угол $\beta_3 = 0$), то

$$h_2 + \alpha_2 + y_1 \alpha_2 h_2 - 1 = 0, \text{ откуда можно вычислить угол } \alpha_2:$$

$$\alpha_2 = \frac{1 - h_2}{1 + y_1 h_2} = \frac{1 - \frac{1}{3}}{1 + 0} = \frac{2}{3}$$

Для проверки правильности расчёта находим значение параметра y_2 :

$$y_2 = \frac{h_2 (1 + y_1 \alpha_2) - 1}{\alpha_2} = \frac{\frac{1}{3} (1 - 0) - 1}{\frac{2}{3}} = \frac{-\frac{2}{3}}{\frac{2}{3}} = -1$$

После подстановки значений y_1, y_2, α_2 и h_2 формулы (3.16) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + h_2 P_2 = P_1 + \frac{1}{3} P_2 ; \\ S_{II} &= y_1 P_1 + y_2 P_2 + W_1 + W_2 = -P_2 + W_1 + W_2 ; \\ S_{III} &= y_1^2 P_1 + \frac{y_2^2}{h_2} P_2 + 2y_1 W_1 + 2\frac{y_2}{h_2} W_2 + \alpha_2 + \frac{1-\alpha_2}{h_2} = 3P_2 - 6W_2 + \frac{2}{3} + 1. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Выразим параметры P и W через параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы (3.18):

$$\begin{aligned} P_1 &= 0,3P_1; \quad W_1 = 0,44W_1; \\ P_2 &= 0,11P_2 + 0,3W_2 + 0,58; \\ W_2 &= 0,11W_2 + 0,6. \end{aligned} \quad (3.20)$$

И после подстановки в (3.19) получим окончательные выражения для сумм Зейделя:

$$\begin{aligned} S_I &= 0,3P_1 + 0,04P_2 + 0,1W_2 + 0,19; \\ S_{II} &= -0,11P_2 + 0,44W_1 - 0,19W_2 + 0,02; \\ S_{III} &= 0,33P_2 + 0,24W_2 - 0,19. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Для удовлетворительного решения поставленной задачи достаточно положить $\mathbf{P}_1=\mathbf{P}_2=\mathbf{W}_1=\mathbf{W}_2=0$, так как свободные члены выражения (3.21) имеют малые величины, а соответствующие аберрации оказываются исправленными в достаточной мере:

$$S_I=0,19, \quad S_{II}=0,02, \quad S_{III}=-0,19.$$

С практической точки зрения было бы интересно оценить в полученной системе величину параметра k – отношения оптических сил компонентов и оптимальное значение воздушного промежутка d .

Для этой цели вновь обратимся к формуле (3.19), где свободные члены в выражении S_{III} определяют оптические силы компонентов: $\Phi_1 = \frac{2}{3}$; $\Phi_2 = 1$.

$$\text{Вычислим параметры } k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{3}{2} = 1,5; \quad d = \frac{\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi}{\Phi_1 \Phi_2} = \frac{\frac{2}{3} + 1 - 1}{\frac{2}{3} \times 1} = 1.$$

Сравним полученные результаты с параметрами объектива, рассчитанного автором.

Таким образом, можно сделать вывод, что в двухкомпонентной оптической системе наряду с оптимальным сочетанием кардинальных отрезков a_F, a'_F, f'_1, f'_2 и d можно получить удовлетворительную коррекцию монохроматических аберраций третьего порядка.

3.5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТИВА С ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Конструкция триплета, состоящего из трёх одиночных линз, является наиболее подходящей для реализации внутренней фокусировки в объективе. С одной стороны, этот объектив-анастигмат относится к группе универсальных объективов с относительным отверстием, не превышающим 1:2.8 и угловым полем не более 40...60°, и обладает приемлемым качеством изображения. С другой стороны, конструкция, в которой отрицательная линза расположена между двумя положительными линзами, наиболее рациональна с точки зрения требований, предъявляемых к габаритам и весу подвижного компонента. Эти требования связаны с ограничением по выбору встраиваемых миниатюрных двигателей, которые могут применяться для фокусировки в современных объективах. Остальные возможные комбинации, отступающие от симметрии в отношении знаков оптических сил линз, приводят к значительным трудностям при исправлении полевых аберраций.

Сравнительная простота оптической схемы триплета позволяет выполнить исследование и расчёт объектива на основе аберраций третьего порядка. Полагая линзы триплета бесконечно тонкими, можно подобрать такие параметры, через которые большинство аберраций объектива выражаются линейно. Известно несколько методик расчёта триплета, предложенных Г.Г.Слюсаревым [3], Н.П.Заказновым [5] и др. Во всех методиках расчёта используется способ разделения параметров на внешние, независимые от формы линз, и внутренние, определяющие конструкцию линз объектива.

Выражения, определяющие коэффициенты аберраций третьего порядка оптической системы, состоящей из трёх тонких компонентов можно представить в следующем виде [2]:

$$\begin{aligned} S_I &= h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_3 P_3 ; \\ S_{II} &= y_1 P_1 + y_2 P_2 + y_3 P_3 + W_1 + W_2 + W_3 ; \\ S_{III} &= \frac{y_1^2}{h_1} P_1 + \frac{y_2^2}{h_2} P_2 + \frac{y_3^2}{h_3} P_3 + 2 \frac{y_1}{h_1} W_1 + 2 \frac{y_2}{h_2} W_2 + 2 \frac{y_3}{h_3} W_3 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 . \end{aligned} \quad (3.22)$$

Рассмотрим сначала аналитические зависимости, определяющие выполнение условий масштаба и исправления аберраций, зависящих от внешних параметров. Выполнение условий, обеспечивающих исправление сферической аберрации, комы и астигматизма, рационально рассмотреть после определения внешних параметров.

Фокусное расстояние объектива принимаем равным единице. Поскольку апертурная диафрагма обычно устанавливается внутри объектива, то для получения более простых зависимостей будем считать, что диафрагма совпадает со вторым компонентом, т.е. $y_2=0$.

Запишем условия нормировки для 1-го и 2-го вспомогательных лучей для предмета на бесконечности:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0; & \alpha_2 &= \Phi_1; & \alpha_4 &= 1; \\ h_1 &= 1; \\ \beta_1 &= 1; & \beta_4 &= 0; \\ y_2 &= 0. \end{aligned} \tag{3.23}$$

Для упрощения зависимостей (3.22) необходимо исключить параметры второго вспомогательного луча y_1 и y_3 .

При $\beta_1=1$ и $y_2=0$ по формулам углов и высот находим

$$y_2 = y_1 - d_1 \beta_2 \Rightarrow y_1 = d_1 \beta_2;$$

$$\beta_2 = \beta_1 + y_1 \Phi_1 = 1 + d_1 \beta_2 \Phi_1 \Rightarrow \beta_2 = \frac{1}{(1 - d_1 \Phi_1)}.$$

(3.24)

$$\beta_3 = \beta_2 + y_2 \Phi_2 = \beta_2;$$

$$y_3 = y_2 - d_2 \beta_3 = -d_2 \beta_2.$$

(3.25)

Поскольку $h_2 = 1 - d_1 \Phi_1$, то после подстановки в (3.24) получаем $\beta_2 = \frac{1}{h_2}$.

Тогда с учётом последней зависимости

$$y_1 = \frac{d_1}{h_2}, \quad y_3 = -\frac{d_2}{h_2}.$$

(3.26)

Величины d и h связаны между собой по формулам углов и высот:

$$h_2 = 1 - d_1 \Phi_1;$$

$$h_3 = 1 - d_1 \Phi_1 - d_2 (\Phi_1 + \Phi_2 - d_1 \Phi_1 \Phi_2).$$

(3.27)

Задача по расчёту триплета [3,5] при условии исправления пяти монохроматических aberrаций третьего порядка состоит в решении уравнений с пятью неизвестными: Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , d_1 и d_2 . Поскольку уравнения являются нелинейными относительно неизвестных, то решение системы уравнений весьма затруднительно.

Поэтому при исследовании коррекционных возможностей триплета придерживаются следующей последовательности. Задают ряд значений параметрам Φ_1 и Φ_2 и при выбранных марках оптического стекла по формуле исправления кривизны Пецваля находят величину Φ_3 . Затем по условиям масштаба и исправления хроматизма положения определяют высоты h_2 и h_3 . После чего по формулам (3.27) вычисляют d_1 и d_2 и далее по формулам исправления

хроматизма увеличения и дисторсии находят $S_{\text{Ихр}}$ и S_V . Указанные вычисления выполняют для различных комбинаций марок оптического стекла.

Будем использовать полученные выше зависимости для определения соотношения между пятью параметрами: оптическими силам компонентов Φ_1, Φ_2, Φ_3 и воздушными промежутками d_1 и d_2 при выполнении условия внутренней фокусировки.

Запишем условие заданного фокусного расстояния (условие масштаба):

$$\Phi_1 + h_2 \Phi_2 + h_3 \Phi_3 = 1 \quad (3.28)$$

Положим, что $\Phi_1=1, \Phi_2=-1$ и после подстановки в (3.27) получаем

$$h_2 = 1 - d_1;$$

$$h_3 = 1 - d_1 - d_1 d_2;$$

$$\Phi_3 = \frac{(1 - d_1)}{(1 - d_1 - d_1 d_2)}. \quad (3.29)$$

Так как в большинстве конструкций триплета приведённые значения величин d_1 и d_2 составляют $0,1 \dots 0,2$, то слагаемые второй степени можно опустить.

$$\Phi_3 = \frac{(1 - d_1)}{(1 - d_1)} = 1. \quad (3.30)$$

Таким образом, мы получили простое соотношение приведённых оптических сил компонентов триплета: $\Phi_1 : \Phi_2 : \Phi_3 = 1 : -1 : 1$.

Преобразуем формулу (3.26) с учётом (3.29):

$$y_1 = \frac{d_1}{1 - d_1}, \quad y_3 = -\frac{d_2}{1 - d_1}. \quad (3.31)$$

Сделаем преобразования в формулах (3.22), определяющих коэффициенты aberrаций третьего порядка, исключив h_2, h_3, y_1 и y_3 :

$$S_I = P_1 + (1 - d_1)P_2 + (1 - d_1)P_3;$$

$$S_{II} = \frac{d_1}{1 - d_1}P_1 - \frac{d_2}{1 - d_1}P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \quad (3.32)$$

$$S_{III} = \frac{d_1^2}{1 - d_1}P_1 + \frac{d_2^2}{1 - d_1}P_3 + 2d_1W_1 - 2d_2W_3 + 1.$$

Для решения задачи выразим параметры P и W через основные параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы [2]:

$$P_i = (\alpha'_i - \alpha_i)^3 P_i + 4\alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i)^2 W_i + \alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i) [2\alpha_i (2 + \pi) - \alpha'_i]; \quad (3.33)$$

$$W_i = (\alpha'_i - \alpha_i)^2 W_i + \alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i) (2 + \pi).$$

Для первого компонента $\alpha = 0, \alpha' = \alpha_2 = 1$, для второго $\alpha = \alpha_2 = 1, \alpha' = \alpha_3$,

для третьего $\alpha = \alpha_3, \alpha' = \alpha_4 = 1$, поэтому:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P_1; \quad W_1 = W_1; \\
 P_2 &= (\alpha_3 - 1)^3 P_2 + 4(\alpha_3 - 1)^2 W_2 + (\alpha_3 - 1)[2(2 + \pi) - \alpha_3]; \\
 W_2 &= (\alpha_3 - 1)^2 W_2 + (\alpha_3 - 1)(2 + \pi); \\
 P_3 &= (1 - \alpha_3)^3 P_3 + 4\alpha_3(1 - \alpha_3)^2 W_3 + (1 - \alpha_3)[2\alpha_3(2 + \pi) - 1]; \\
 W_3 &= (1 - \alpha_3)^2 W_3 + \alpha_3(1 - \alpha_3)(2 + \pi).
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

Определим систему, удовлетворяющую условию $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$.

После подстановки значений $d_1 = 0,2$ и $d_2 = 0,1$ формулы (3.32) принимают следующий

вид:

$$\begin{aligned}
 S_I &= P_1 + \frac{4}{5}P_2 + \frac{4}{5}P_3; \\
 S_{II} &= \frac{1}{4}P_1 - \frac{1}{8}P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\
 S_{III} &= \frac{1}{20}P_1 + \frac{1}{80}P_3 + \frac{2}{5}W_1 - \frac{1}{5}W_3 + 1. \\
 \alpha_3 &= \alpha_2 + h_2\Phi_2 = 1 + (1 - d_1) = 2 - 0,2 = 1,8.
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

Выразим параметры P и W через параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы (3.34):

$$\begin{aligned}
 P_1 &= P_1; \quad W_1 = W_1; \\
 P_2 &= 0,51P_2 + 2,56W_2 + 2,8; \\
 W_2 &= 0,64W_2 + 2,12; \\
 P_3 &= -0,51P_3 + 4,61W_3 - 8,1; \\
 W_3 &= 0,64W_3 - 3,8.
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

И после подстановки в (3.35) получим окончательные выражения для сумм Зейделя:

$$\begin{aligned}
 S_I &= P_1 + 0,41P_2 + 2,05W_2 - 0,41P_3 + 3,69W_3 - 4,24; \\
 S_{II} &= 0,25P_1 + 0,06P_3 + W_1 + 0,64W_2 + 0,06W_3 - 0,67; \\
 S_{III} &= 0,05P_1 - 0,05P_3 + 0,4W_1 - 0,08W_3 + 1,68.
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

Запишем условия нормировки для 1-го и 2-го вспомогательных лучей для предмета на конечном расстоянии и будем считать, что при фокусировке объектива на конечное расстояние воздушные промежутки между компонентами изменятся таким образом, что $d_1 = d_2$ и $d_2 = d_1$.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\alpha}_1 &= -\frac{1}{10}; \quad \tilde{h}_1 = 1; \quad \beta = -\frac{1}{10}; \\
 \tilde{\beta}_1 &= 1; \quad \tilde{y}_1 = s_p = \frac{1}{10}; \quad \tilde{d}_1 = 0,1; \quad \tilde{d}_2 = 0,2.
 \end{aligned} \tag{3.38}$$

Где $\tilde{\alpha}, \tilde{h}, \tilde{\beta}, \tilde{y}, \tilde{d}$ - обозначены параметры для предмета на конечном расстоянии

По формулам углов и высот последовательно находим значения

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}_2 &= \tilde{\alpha}_1 + \tilde{h}_1 \Phi_1 = -\frac{1}{10} + 1 = \frac{9}{10}; \\ \tilde{h}_2 &= \tilde{h}_1 - \tilde{d}_1 \tilde{\alpha}_2 = 1 - \frac{1}{5} \times \frac{9}{10} \approx \frac{4}{5}; \\ \tilde{\alpha}_3 &= \tilde{\alpha}_2 + \tilde{h}_2 \Phi_2 = \frac{9}{10} + \frac{4}{5} = \frac{17}{10}; \\ \tilde{h}_3 &= \tilde{h}_2 - \tilde{d}_2 \tilde{\alpha}_3 = \frac{4}{5} - \frac{1}{10} \times \frac{17}{10} \approx \frac{3}{5}; \\ \tilde{\alpha}_4 &= \tilde{\alpha}_3 + \tilde{h}_3 \Phi_3 = \frac{17}{10} - \frac{3}{5} = \frac{11}{10}.\end{aligned}\tag{3.39}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\beta}_2 &= \tilde{\beta}_1 + \tilde{y}_1 \Phi_1 = 1 + \frac{1}{10} = \frac{11}{10}; \\ \tilde{y}_2 &= \tilde{y}_1 - \tilde{d}_1 \tilde{\beta}_2 = \frac{1}{10} - \frac{1}{5} \times \frac{11}{10} \approx -\frac{1}{10}; \\ \tilde{\beta}_3 &= \tilde{\beta}_2 + \tilde{y}_2 \Phi_2 = \frac{11}{10} + \frac{1}{10} = \frac{6}{5}; \\ \tilde{y}_3 &= \tilde{y}_2 - \tilde{d}_2 \tilde{\beta}_3 = -\frac{1}{10} - \frac{1}{10} \times \frac{6}{5} \approx -\frac{1}{5}; \\ \tilde{\beta}_4 &= \tilde{\beta}_3 + \tilde{y}_3 \Phi_3 = \frac{6}{5} - \frac{1}{5} = 1.\end{aligned}\tag{3.40}$$

Подставим полученные значения углов и высот в формулы (3.22), определяющие коэффициенты аберраций третьего порядка

$$\begin{aligned}S_I &= P_1 + \frac{4}{5}P_2 + \frac{3}{5}P_3; \\ S_{II} &= \frac{1}{10}P_1 - \frac{1}{10}P_2 - \frac{1}{5}P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\ S_{III} &= \frac{1}{100}P_1 + \frac{1}{80}P_2 + \frac{1}{15}P_3 + 2W_1 - \frac{1}{4}W_2 - \frac{2}{3}W_3 + 1.\end{aligned}\tag{3.41}$$

Выразим параметры P и W через параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы (3.33):

$$\begin{aligned}P_1 &= (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1)^3 P_1 + 4\tilde{\alpha}_1 (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1)^2 W_1 + \tilde{\alpha}_1 (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1) [2\tilde{\alpha}_1 (2 + \pi) - \tilde{\alpha}_2]; \\ W_1 &= (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1)^2 W_1 + \tilde{\alpha}_1 (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1) (2 + \pi); \\ P_2 &= (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2)^3 P_2 + 4\tilde{\alpha}_2 (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2)^2 W_2 + \tilde{\alpha}_2 (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2) [2\tilde{\alpha}_2 (2 + \pi) - \tilde{\alpha}_3]; \\ W_2 &= (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2)^2 W_2 + \tilde{\alpha}_2 (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2) (2 + \pi); \\ P_3 &= (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3)^3 P_3 + 4\tilde{\alpha}_3 (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3)^2 W_3 + \tilde{\alpha}_3 (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3) [2\tilde{\alpha}_3 (2 + \pi) - \tilde{\alpha}_4]; \\ W_3 &= (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3)^2 W_3 + \tilde{\alpha}_3 (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3) (2 + \pi).\end{aligned}\tag{3.42}$$

$$\begin{aligned}P_1 &= P_1 + 4W_1 + 0,62; \\ W_1 &= W_1 - 0,27; \\ P_2 &= 1,12P_2 + 2,3W_2 + 2,21; \\ W_2 &= 0,64W_2 + 1,91; \\ P_3 &= -0,22P_3 + 2,45W_3 + 8,07; \\ W_3 &= 0,36W_3 - 2,7.\end{aligned}\tag{3.43}$$

И после подстановки в (3.41) получим окончательные выражения для сумм Зейделя:

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + 0,9P_2 - 0,13P_3 + 4W_1 + 1,84W_2 + 1,47W_3 + 7,23 ; \\ S_{II} &= 0,1P_1 - 0,11P_2 + 0,04P_3 + 1,4W_1 + 0,41W_2 - 0,13W_3 - 2,83 ; \\ S_{III} &= 0,01P_1 + 0,01P_2 - 0,02P_3 + 2,04W_1 - 0,14W_2 - 0,07W_3 + 2,39 . \end{aligned} \quad (3.44)$$

Полученные в ходе исследования результаты показывают, что найденная конфигурация объектива может иметь удовлетворительную коррекцию трёх монохроматических aberrаций. Сравнивая формулы (3.37) и (3.44) можно видеть, что и в положении бесконечно удалённого предмета и при фокусировке на близкое расстояние суммы aberrаций меняются незначительно. Для эффективного решения задачи коррекции aberrаций достаточно положить $P_1=P_2=P_3=W_1=W_2=W_3=0$. А так как члены выражений сумм aberrаций имеют близкие значения для обоих положений предмета, то при изменении положения предметной плоскости качество изображения не будет ухудшаться, оставаясь на одном уровне.

Таким образом, *абберационный анализ* двухкомпонентного проекционного объектива показал, что в объективе с оптимальным сочетанием величин кардинальных отрезков может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка. На основании полученных результатов был создан компактный объектив с фокусным расстоянием 20 мм, с относительным отверстием 1:5 и проекционным расстоянием 400 мм.

В ходе исследования триплета была выведена оригинальная формула соотношения оптических сил компонентов, позволяющая получить простое решение для реализации внутренней фокусировки в объективе. На основе анализа aberrаций третьего порядка было показано, что в объективе с таким сочетанием оптических сил может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка.

Полученные результаты легли в основу разработки объектива с внутренней фокусировкой с фокусным расстоянием 35 мм и относительным отверстием 1:2.8, с угловым полем 45° и с ближней дистанцией фокусировки 0,5 м, который был сконструирован и запущен в серийное производство (рис.3.5).

Найденные решения объективов были защищены авторскими свидетельствами [7,45,62,87,112].

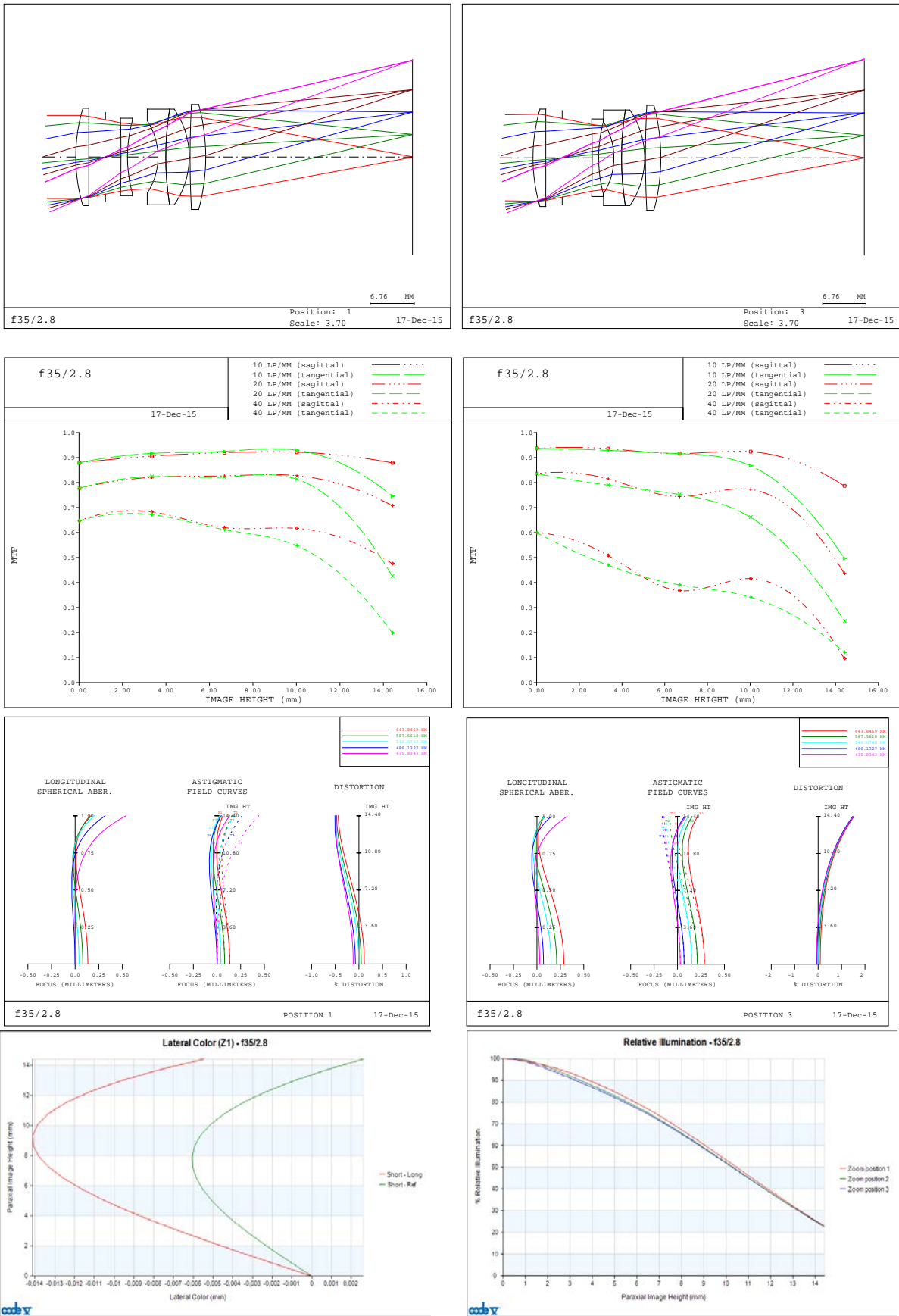


Рис. 3.5 Объектив с внутренней фокусировкой

слева – схема объектива и характеристики для предмета на бесконечности, справа – при фокусировке на 0,5 м.

3.6 КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ В РАЗВИВАЮЩЕМСЯ СЕКТОРЕ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Рынок миниатюрных проекторов (pico projector, mobile projector) активно развивается в последнее время. Такие проекторы весьма малы и помещаются на ладонь, а самые маленькие их представители весят не более 200÷300 г. В качестве источников света в них используются светодиоды или лазерные диоды, обладающие высокой яркостью и способные работать до 30÷50 тысяч часов. Разрешение экрана редко достигает 1024×768 точек, чаще оно составляет 800×600 точек, но его небольшого размера (до одного метра по диагонали) вполне достаточно для аудитории до 10 человек. При выборе оптимальной конструкции миниатюрного проектора необходимо в первую очередь обратить внимание на такие параметры как габариты, вес, яркость, разрешение, световая эффективность, цена.

Отвечающий за высокое качество проецируемого изображения объектив является ключевым элементом минипроектора. При этом он должен быть миниатюрным, компактным и состоять из минимально возможного количества элементов. В ультракомпактных объективах, предназначенных для цифровых микрозеркальных проекторов (DMD), необходимо учитывать призмы с полным внутренним отражением (TIR) и дихроичные зеркала. Эти оптические элементы могут находиться либо внутри объектива, либо в заднем отрезке объектива, что значительно усложняет расчёт.

Размер пикселя (5÷7 мкм) в оптическом модуляторе, как и размеры оптического модуля (<10 см³) минипроектора продолжают неуклонно уменьшаться. И в этой связи становится всё труднее выдерживать требования, предъявляемые к относительному отверстию, угловому полю и разрешающей способности объектива.

Известно достаточно много схем проекционных объективов, но большинство из них по ряду причин не могут быть применены для встроенных минипроекторов. Наряду с тем, что объектив минипроектора должен быть компактным и иметь высокое разрешение (50÷60 лин/мм), в его конструкции должны быть выполнены дополнительные условия: большой задний отрезок для согласования объектива с осветительной системой проектора, а для некоторых приложений – вынесенный входной зрачок при требуемых значениях относительного отверстия и углового поля.

Перечисленным условиям в определённой степени удовлетворяет конструкция телеобъектива. С другой стороны, эффективность и равномерность света в проекторах на основе отражающих микрозеркальных (DLP) или жидкокристаллических (LCoS) дисплеев напрямую зависят от телецентричности хода главных лучей. Это требование, как и требование большого заднего отрезка, справедливо для всех известных на сегодня

проекционных технологий, применяемых в мультимедийных проекторах: построенных на основе сканирующих систем (MEMS) или жидкокристаллических дисплеев (LCoS и LCD).

Поэтому создание компактного объектива с высоким разрешением для встроенных минипроекторов является достаточно актуальной задачей.

Направлениями решения этой задачи в настоящей работе стали:

- *определение оптимальной схемы объектива с учётом описанных выше требований;*
- *рациональное применение асферических, дифракционных элементов для коррекции aberrаций,*

что, с одной стороны, позволило бы упростить конструкцию объектива (в части минимизации числа линз), а с другой стороны, обеспечить его высокие оптические характеристики.

3.6.1 РАСЧЁТ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ОБЪЕКТИВА И ЕГО КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Соотношение между длиной и фокусом объектива обычно составляет:

$$L \sim (2\div 3) f' \quad (3.45)$$

где L – полная длина объектива,

f' – фокусное расстояние.

Однако эта величина слишком велика для минипроекторов. Если перейти к схеме телеобъектива, то соотношение примет более предпочтительный вид:

$$L < 1,4 f' \quad (3.46)$$

$$S'_f > 0,25 f' \quad (3.47)$$

где S'_f – задний фокальный отрезок.

На рис.3.6а показан вид объектива после окончательной оптимизации. Несмотря на достаточно простое решение, эта конструкция удовлетворяет всем необходимым требованиям: вынос входного зрачка, большой задний отрезок, телецентричность. Телецентрический ход главного луча в объективе выполняется при выполнении равенства:

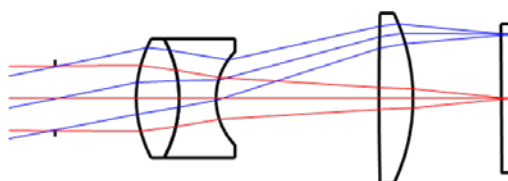
$$S_f = S_p \quad (3.48)$$

где S_f – передний фокальный отрезок, S_p – вынос входного зрачка.

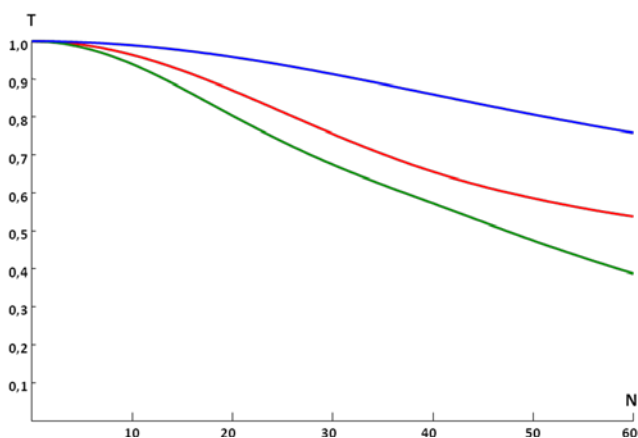
Воздушный промежуток между линзами и большой задний отрезок позволяет максимально “сжать” объектив в объёме при согласовании его с осветительной системой и при встраивании объектива в оптический модуль проектора. Вынос входного зрачка

особенно важен для сканирующих систем – он одновременно обеспечивает и пространство для установки сканера и возможность расположения дополнительных оптических элементов (например, оптических фильтров). Для эффективной коррекции сферической aberrации первая поверхность склейки выполнена асферической.

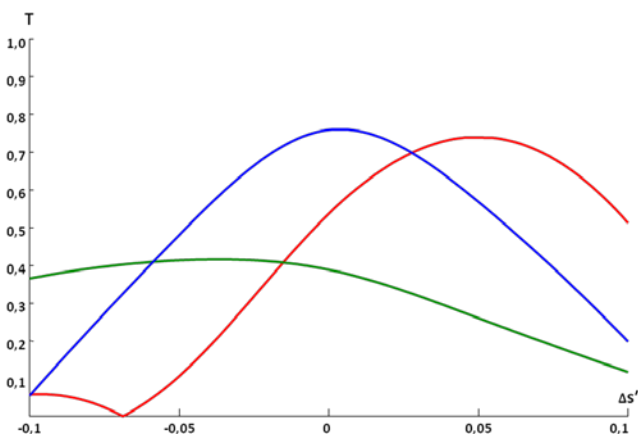
На рис.3.6б представлен график оптической передаточной функции, на рис.3.6в – график дефокусировки. Из графиков следует, что разрешение объектива составляет 60 лин/мм при контрасте 0,5 – что соответствует разрешению пикселей с размером 10÷15 мкм.



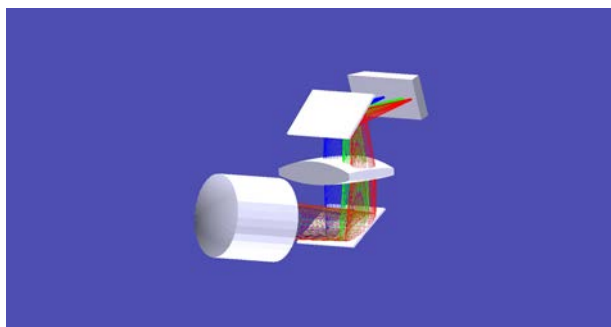
a



б



в



2

Рис. 3.6 ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ОБЪЕКТИВ

a – вид объектива; *b* – график оптической передаточной функции; *в* – график дефокусировки; *г* – 3D-модель на графиках: Т – контраст в отн.ед., N – пространственная частота в мм⁻¹, Δs' – дефокусировка в мм, красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

Пример разработанной автором компоновки объектива с изломом оптической оси при помощи двух зеркал показан на рис.3.6г. Подобная конфигурация проекционного модуля была реализована в мобильном проекторе [43] с Y–координатным оптическим модулятором и X–координатным сканирующим зеркалом.

Конструктивные параметры двухкомпонентного объектива, предложенного автором в [7,45,87] приведены в табл.3.3.

Т а б л и ц а 3.3

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коническая постоянная k
Экран	∞	400	-	-	
АД	∞	5	1	-	
3	7,241	2,7	1,9225	35,9	-0,869
4	-7,241	2	1,7508	27,7	
5	4,358	10,45	1	-	
6	57,6	2,2	1,6201	63,5	
7	-12,07	5,87	1	-	
Дисплей	∞	-	-	-	

3.6.2 ОБЪЕКТИВ С ДИФРАКЦИОННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТОМ И ЕГО ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис.3.7 показан вид объектива, состоящего из 2х одиночных линз.

Для коррекции хроматических aberrации на поверхностях первой линзы нанесён профиль дифракционного элемента.

Дифракционный оптический элемент рассчитывался по формуле:

$$\Phi(Y) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum (C_n Y^n) \quad (3.49)$$

ГДЕ $\Phi(Y)$ – фазовая функция; C_n – фазовый коэффициент; Y^n – координата поверхности;
 λ_0 – длина волны; $n = 1, 2, 3 \dots$

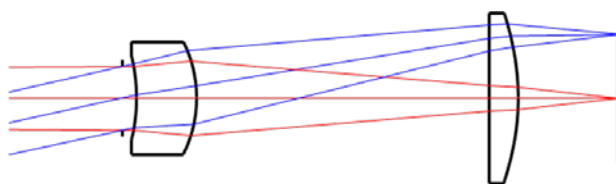
Вторая линза объектива – плоско-выпуклая и её задняя поверхность имеет асферический профиль для исправления полевых aberrаций и для обеспечения телецентрического хода главного луча.

Асферическая поверхность рассчитывалась по формуле:

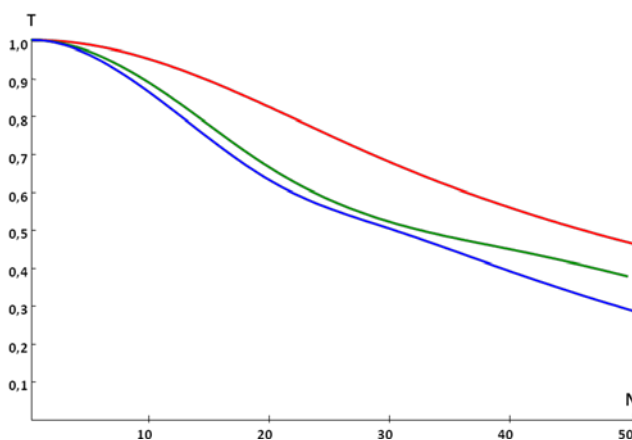
$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 \quad (3.50)$$

ГДЕ z – стрелка прогиба, c – кривизна поверхности; r – радиус поверхности; k – коническая постоянная;
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – коэффициенты асферики.

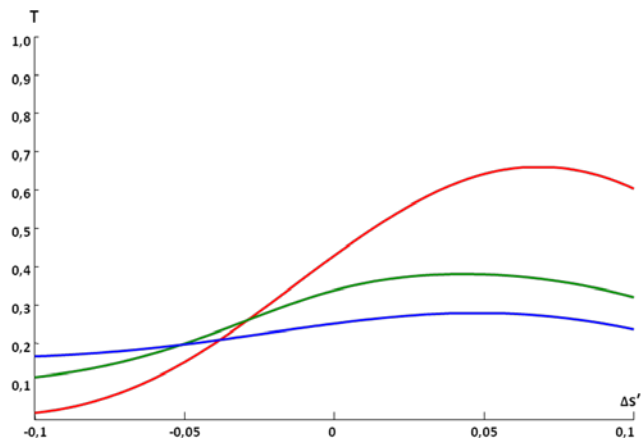
Этот вариант объектива также имеет значительный воздушный промежуток и задний отрезок для размещения дополнительных зеркальных или призматических элементов, позволяющих существенно сократить размеры объектива в объёме. На рис.3.3 показаны вид объектива с ходом лучей, графики оптической передаточной функции, дефокусировки и 3D модель. Такая компоновка объектива даёт возможность встроить его в проекционный модуль толщиной менее 10 мм.



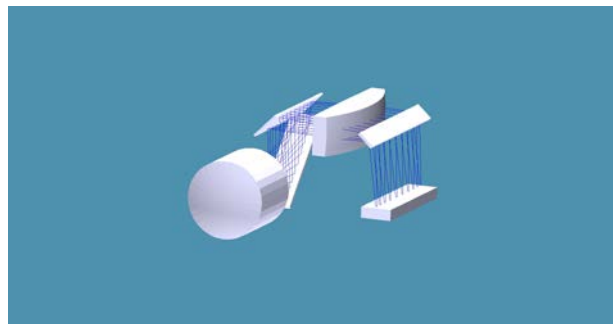
a



б



б



г

РИС. 3.7 ОБЪЕКТИВ С ДИФРАКЦИОННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТОМ

a – вид объектива; b – график оптической передаточной функции; $в$ – график дефокусировки; $г$ – 3D-модель на графиках: T – контраст в отн.ед., N – пространственная частота в мм^{-1} , $\Delta s'$ – дефокусировка в мм, красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

Конструктивные параметры объектива с дифракционным оптическим элементом, рассчитанного автором [7,54] приведены в табл.3.4.

Т а б л и ц а 3.4

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коэффициенты DOE и асферики
Экран	∞	395	-	-	
АД	∞	4	1	-	
3	-11,22	4,2	1,5168	64,2	$C_1=2,4951E-03$ $C_2=4,6962E-04$
4	-7,264	20,4	1	-	$C_1=-3,6445E-03$ $C_2=-9,4089E-05$
5	∞	2	1,5168	64,2	
8	-14,01	7	1	-	$\alpha_1=1,4221E-04$ $\alpha_2=-4,4468E-07$ $\alpha_3=-1,0659E-08$
Дисплей	∞	-	-	-	

3.6.3 АПОХРОМАТИЧЕСКИЙ ДУБЛЕТ

Третий вариант компактного проекционного объектива (рис.3.8) с апохроматической коррекцией представляет собой обычную склейку с дифракционным покрытием на одной из наружных поверхностей [7,53].

Как известно, апохроматическая коррекция (“S” коррекция или устранение вторичного спектра) подразумевает равенство расстояний до изображения для выбранного диапазона длин волн λ_{min} , λ_0 и λ_{max} , где λ_0 – основная длина волны выбранного диапазона.

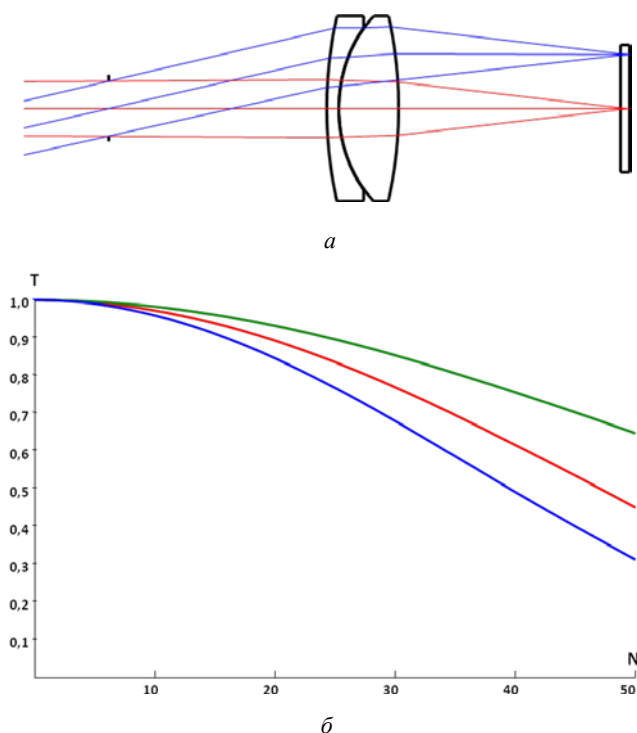
В общем виде формулу апохроматизации можно представить:

$$S_{\lambda_{min}} = S_{\lambda_0} = S_{\lambda_{max}} \quad (3.51)$$

где $S_{\lambda_{min}}$, S_{λ_0} и $S_{\lambda_{max}}$ – расстояния до изображения для соответствующих длин волн.

Результат апохроматической коррекции иллюстрируют графики на рис.3.4в. Как видно из графиков, смещение фокусов синего и красного цветов относительно зелёного цвета не превышает 5 мкм, что примерно в 6 раз меньше по сравнению с обычным ахроматом.

Следует отметить, что, как и в первых двух вариантах объектива, в конструкцию апохроматического дублета можно ввести дополнительные зеркальные или призматические элементы для сокращения размеров объектива в объёме.



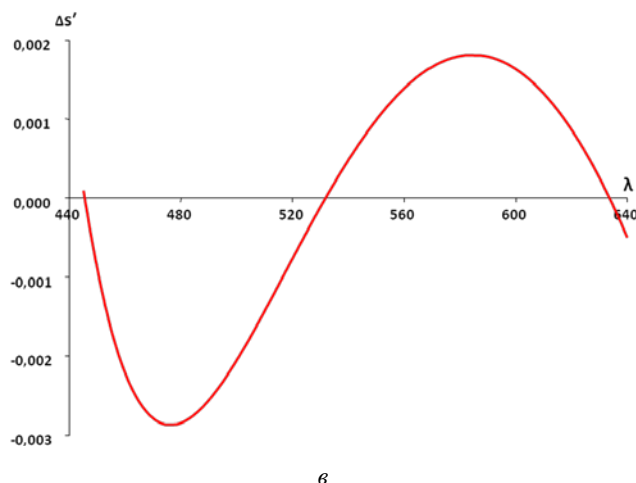


Рис. 3.8 АПОХРОМАТИЧЕСКИЙ ДУБЛЕТ

a – вид объектива; b – график оптической передаточной функции; $в$ – график апохроматизации; на графиках: T – контраст в отн. ед., N – пространственная частота в мм^{-1} , $\Delta s'$ – дефокусировка в мм, λ – длина волны в нм, красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

Общие исходные параметры объективов приведены в табл. 3.5

Таблица 3.5

Фокусное расстояние f' мм	Относительное отверстие D/f'	Угловое поле 2γ мм	Размер пикселя мкм		Проекционное расстояние Мм
			Разрешение		
			VGA	SVGA	
20	$> 1/5$	8	12,5	10	400

Конструктивные решения компактных объективов позволяют создать оптический модуль минипроектора с размерами $6 \div 8 \text{ см}^3$ и толщиной менее 10 мм.

Эти решения были опробованы при создании прототипа мобильного проектора, описанного в работах автора [18,21,22,24,25,36,62,65].

3.7 СВЕТОСИЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ

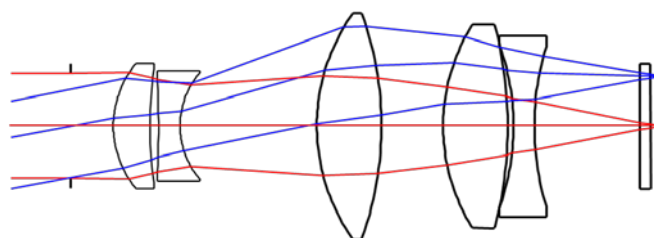
Одним из важных параметров проекционных объективов, определяющих яркость изображения на экране, является относительное отверстие объектива (светосила). Обеспечение требуемого значения этого параметра в объективе минипроектора является непростой задачей, учитывая ограничение в размерах оптического модуля минипроектора. Выше были рассмотрены примеры конструкции компактных объективов с вынесенным зрачком и относительным отверстием не превышающим 1:4, что для использования минипроектора в аудитории с внешним освещением часто бывает недостаточно.

3.7.1 ПЯТИЛИНЗОВЫЙ ОБЪЕКТИВ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

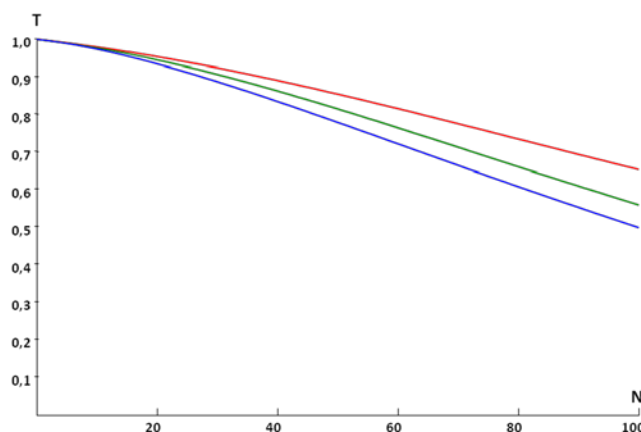
В некоторых случаях при расчёте объектива для минипроектора, работающего на оптическом модуляторе с размером пикселей $5\div 10$ мкм помимо увеличения светосилы до значений $2,5\div 2,8$ требуется получить и высокое разрешение > 100 лин/мм.

На рис.3.9 приводится вид объектива с вынесенным входным зрачком, состоящим из пяти одиночных сферических линз, с относительным отверстием 1:2,5, фокусным расстоянием 12,5 мм и угловым полем $22,5^\circ$.

Нужно отметить, что искомая конфигурация была определена в процессе анализа и сравнения множества конструкций. В результате строгого ограничения параметров объектива – относительного отверстия, углового поля, длины и количества линз была достигнута высокая разрешающая способность при относительно простой и недорогой конструкции.



a



б

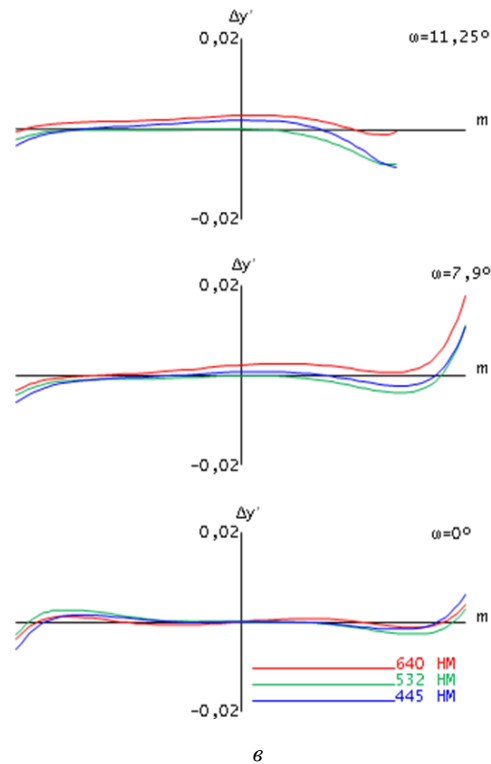


Рис. 3.9 СВЕТОСИЛЬНЫЙ ОБЪЕКТИВ

a – вид объектива; *б* – график оптической передаточной функции; *в* – графики лучевых aberrаций на графиках: Т – контраст в отн.ед., N – пространственная частота в мм^{-1} , $\Delta y'$ – поперечная сферическая aberrация в мм, m – координата зрачка, ω – половина углового поля, красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

На рис.3.9 представлены графики оптической передаточной функции и лучевых aberrаций 5-ти линзового объектива. Конструктивные параметры объектива с высоким разрешением приведены в табл.3.6.

Т а б л и ц а 3.6

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии V_d
Экран	∞	396	-	-
АД	∞	2	1	-
3	4,834	1,7	1,6688	57,3
4	18,22	0,39	1	-
5	-70,58	1	1,6378	42,4
6	4,007	6,3	1	-
7	9,61	3	1,4970	81,6
8	-16,71	2,8	1	-
9	9,42	3	1,8806	41,0
10	-19,73	0,24	1	-
11	-12,36	1	1,8466	23,8
12	13,93	4,87	1	-
13	∞	0,5	1,4983	65,0
14	∞	0,5	1	-
Дисплей	∞	-	-	-

3.7.2 КОМБИНИРОВАННЫЙ ОБЪЕКТИВ КАК СПОСОБ ОБЪЕДИНЕНИЯ ПРОЕКЦИОННОГО И ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ТРАКТОВ В МИНИПРОЕКТОРЕ

Одним из эффективных способов уменьшения размеров оптического модуля в минипроекторе является объединение проекционного и осветительного модуля с помощью комбинирующих элементов – светоделительной призмы или дихроичного зеркала.

Для решения этой задачи была предложена конструкция с апертурной диафрагмой, расположенной внутри объектива [81].

На рис.3.10 показана схема комбинированного объектива, предложенная автором, с относительным отверстием 1:2,5, фокусным расстоянием 12,5 мм и угловым полем 40° после окончательной оптимизации.

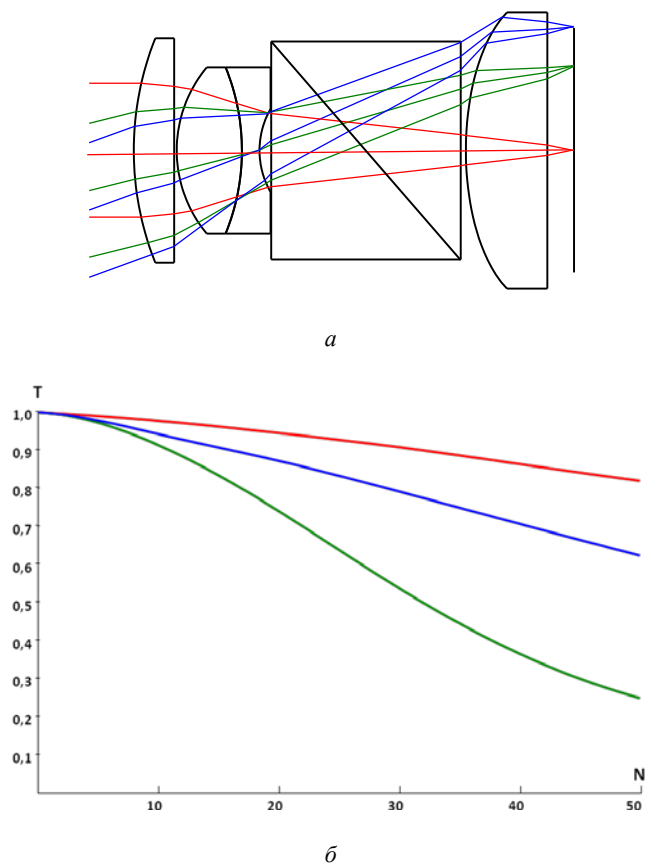


Рис. 3.10 КОМБИНИРОВАННЫЙ ОБЪЕКТИВ

a – вид объектива; *б* – график оптической передаточной функции:
на графике: *T* – контраст в отн.ед., *N* – пространственная частота в мм⁻¹,
красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

Эта конструкция объектива обладает рядом отличительных особенностей. Во-первых, компактность – длина объектива примерно равна его фокусному расстоянию, во-вторых – диаметры линз – минимальны (при таком расположении апертурной диафрагмы размеры линз определяются только угловым полем объектива) и в-третьих – воздушный промежуток,

который позволяет интегрировать светоделительную призму или полупрозрачное зеркало для объединения с осветительной частью минипроектора.

Объектив имеет в своём составе только три компонента, а для эффективной коррекции сферических aberrаций и обеспечения телецентричности хода главного луча в нём применена одна асферическая поверхность.

На рис.3.10б представлен график оптической передаточной функции комбинированного объектива. Конструктивные параметры комбинированного объектива приведены в табл.3.7.

Таблица 3.7

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коническая постоянная k
Объект	∞	∞	1	-	
2	11,25	1,5	1,7439	44,8	
3	∞	0,1	1	-	
4	4,873	2,4	1,7344	45,6	
5	-8,156	0,65	1,7529	29,8	
АД	4,105	0,43	1	-	
7	∞	7	1,5164	56,7	
8	∞	0,2	1	-	
9	12,21	3	1,7231	45,8	3,579
10	∞	1	1	-	
Дисплей	∞	-	-	-	

3.8 ОБЪЕКТИВ С ОФСЕТОМ. ПРОСТОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СДВИГА ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ В МИНИПРОЕКТОРЕ

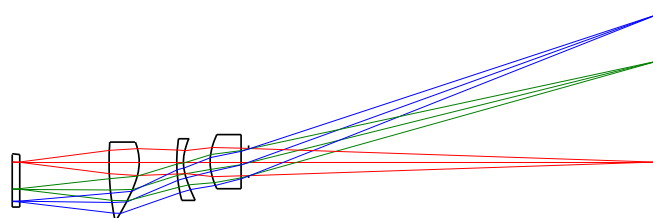
Любой современный мультимедийный проектор должен иметь возможность использования его в настольном варианте – когда нижняя граница проецируемого проектором изображения находится выше плоскости стола, на котором он установлен. Параметр, характеризующий величину сдвига оптической оси проектора относительно нижней границы изображения называется “офсетом” (offset) и измеряется в процентах к высоте изображения при известном расстоянии от объектива проектора до экрана.

Существуют различные варианты конструкций проекторов с офсетом. В некоторых моделях офсет достигается регулировками высоты ножек основания проектора относительно стола или сдвигом оптической оси объектива (lens shift) относительно центра матрицы дисплея. В этом случае должна быть предусмотрена возможность компенсации наклона изображения, расфокусировки и так называемого “кейстоуна” (keystone) – дисторсионных искажений, возникающих на экране в результате разности увеличений для различных точек поля зрения.

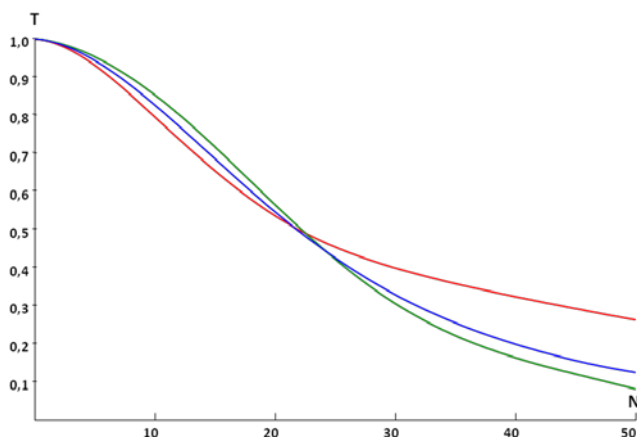
Но введение компенсирующих элементов значительно усложняет конструкцию проектора и увеличивает его размеры.

Одним из самых простых решений реализации офсета в минипроекторе может быть рассмотрен вариант без децентрировки изображения, когда матрица дисплея размещена в нижней половине углового поля объектива. Это позволяет получить на экране проектора практически идеальное изображение без искажений, но при этом расчётное поле объектива должно быть в два раза больше используемого.

На рис.3.11а приводится вид объектива с офсетом, состоящего из трёх одиночных асферических линз. Относительное отверстие объектива 1:4, фокусное расстояние 14,3 мм и расчётное угловое поле 40°.



a



б

РИС. 3.11 ОБЪЕКТИВ С ОФСЕТОМ

a – вид объектива; *б* – график оптической передаточной функции на графике: *T* – контраст в отн.ед., *N* – пространственная частота в мм^{-1} , красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

На рис.3.11б представлен график оптической передаточной функции объектива с офсетом, а его конструктивные параметры приведены в табл.3.8.

Таблица 3.8

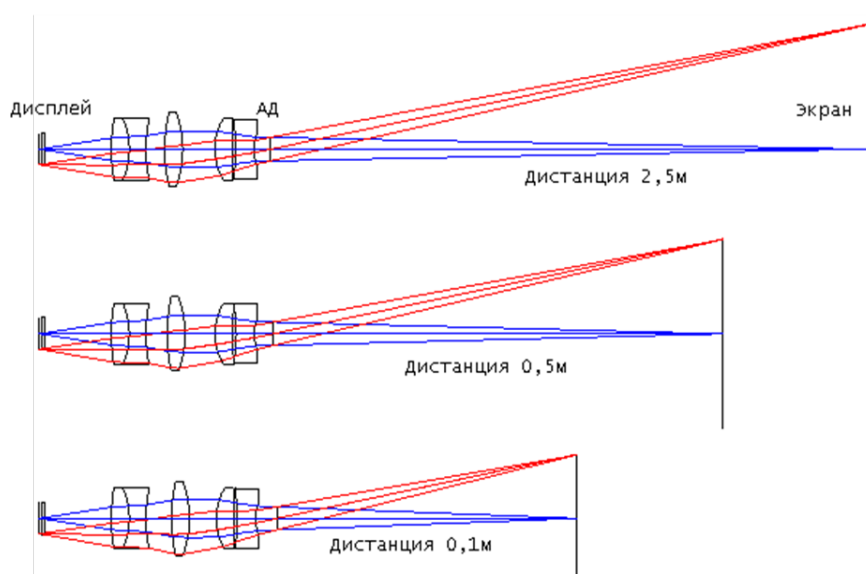
№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коническая постоянная k
Объект	∞	1	1,5168	64,2	
2	∞	11,8	1	-	
3	39,3	3,9	1,5725	57,5	
4	-6,801	5	1	-	-3,281
5	18,66	0,9	1,9229	20,9	
6	5,565	3,5	1	-	-4,490
7	6,634	4	1,5583	54,2	-2,647
8	114,7	1	1	-	
АД	∞	4	-	-	
Экран	∞	50	-	-	

3.9 ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКИ В ОБЪЕКТИВЕ МИНИПРОЕКТОРА

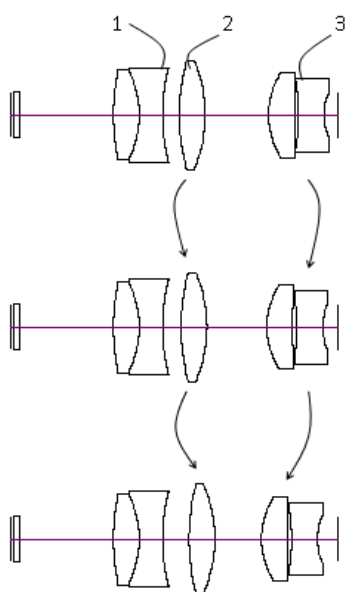
Поскольку проектор может применяться в различных помещениях, то при работе с ним очень важно иметь функцию плавной фокусировки изображения на различное расстояние от проектора до экрана, которое обычно составляет от нескольких сантиметров до нескольких метров.

На рис.3.12 показан пример объектива [82] с внутренней фокусировкой при изменении расстояния до экрана в диапазоне от 10 см до 2,5 м.

Объектив включает три компонента: 1-ый компонент неподвижен, 2-ой и 3-й перемещаются, причём расстояние от предметной плоскости до плоскости апертурной диафрагмы остаётся неизменным.



a



б

Рис. 3.12 ОБЪЕКТИВ С ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

а – вид объектива; б – схема перемещений

Конструктивные параметры объектива с внутренней фокусировкой приведены в табл.3.9, переменные данные – в табл.3.10.

Таблица 3.9

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии V_d
Дисплей	∞	0,5	1	-
2	∞	0,5	1,506	65,2
3	∞	11,09	-	-
4	27,83	3	1,713	53,8
5	-12,09	2,8	1,741	28,2
6	25,32	d6	1	-
7	25,53	3	1,621	63,5
8	-16,62	d8	1	-
9	9,49	3	1,881	41,0
10	161,5	0,52	1	-
11	-25,74	3	1,621	36,4
12	6,667	d12	1	-
АД	∞	d13	1	-
Экран	∞	-	-	-

Таблица 3.10

ПАРАМЕТР	Поз 1	Поз 2	Поз 3
Фокусное расстояние	12,64	12,76	12,8
Относительное отверстие	2,5	2,5	2,5
d6	3,06	2,15	1,96
d8	5,52	7,06	7,43
d12	2,45	1,81	1,63
d13	0,1м	0,5м	2,5м

3.10 ОБЪЕКТИВ С УЛЬТРАКОРОТКИМ ПРОЕКЦИОННЫМ РАССТОЯНИЕМ ДЛЯ НАСТОЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ

В последние несколько лет миниатюрные проекторы, встроенные в мобильные устройства – цифровые камеры и сотовые телефоны, стали активно применяться для настольной проекции. На рис.3.13 показан пример такого устройства для проецирования интерактивной клавиатуры компьютера на поверхность стола [63].



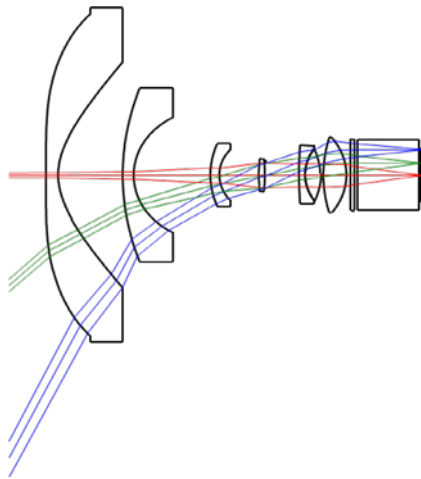
Рис. 3.13 НАСТОЛЬНЫЙ ПРОЕКТОР

Проекционное расстояние минипроектора должно быть сравнимо с размером современного мобильного телефона 100÷120 мм, а минимальный размер изображения должен быть не менее формата А4 (14 дюймов по диагонали). Кроме того, это устройство должно быть универсальным, т.е. обладать возможностью и для вертикальной проекции изображения на экран, а также иметь фокусировку. Очевидно, что для обеспечения указанных требований необходим миниатюрный объектив с очень коротким фокусом и широким угловым полем.

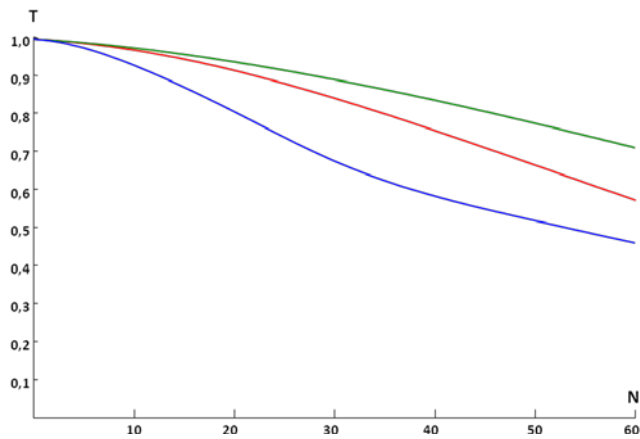
На рис.3.14а показан вид объектива с ультракоротким фокусным расстоянием 2,5 мм, относительным отверстием 1:2,2 и угловым полем 130°.

При выборе подходящей схемы был проведён тщательный анализ по определению оптимального количества оптических элементов, количества и расположения асферических и дифракционных поверхностей в схеме для наиболее эффективной коррекции aberrаций. При этом учитывалась и доступность марок стёкол, оказывающих значительное влияние на вес и конечную цену объектива.

Как видно из представленных графиков, разрешение объектива составляет более 60 лин/мм при контрасте 0,5 по всему угловому полю 130°, а дисторсия не превышает 5%. Длина объектива по линзам составляет не более 55 мм.



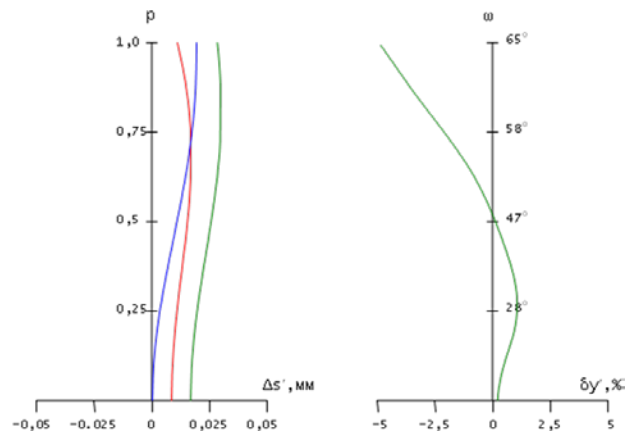
a



б

Рис. 3.14 ОБЪЕКТИВ С УЛЬТРАКОРОТКИМ ПРОЕКЦИОННЫМ РАССТОЯНИЕМ
a – вид объектива; *б* – график оптической передаточной функции:
 на графике: T – контраст в отн.ед., N – пространственная частота в мм^{-1} ,
 красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

На рис.3.14*б* представлены графики оптической передаточной функции объектива,
 на рис.3.15 – графики аберраций.



a

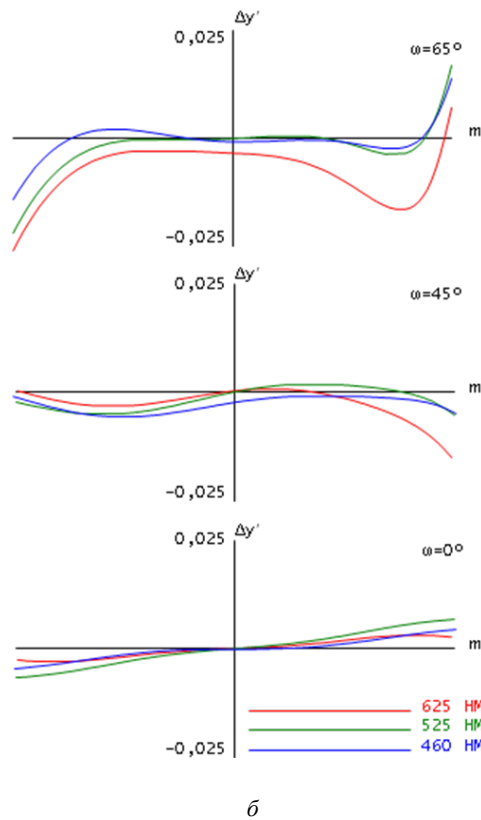


РИС. 3.15 ГРАФИКИ АБЕРРАЦИЙ

a – хроматические aberrации и дисторсия; *b* – сферические aberrации;
на графиках: $\Delta y'$ – поперечная сферическая aberrация в мм, *m* – координата зрачка,
p – диаметр входного зрачка в отн.ед., $\Delta s'$ – продольная сферическая aberrация,
 ω – половина углового поля, $\delta y'$ – дисторсия.

Конструктивные параметры объектива с ультракоротким проекционным расстоянием
приведены в табл.3.11, переменные параметры – в табл.3.12.

Таблица 3.11

№ поверхности	Радиус <i>R</i> мм	Толщина <i>d</i> мм	Показатель преломления <i>n_d</i>	Коэффициент дисперсии <i>V_d</i>	Коэффициенты DOE и асферики
Экран	∞	d1	1	-	
2	-4934	2	1,497	81,6	$\alpha_1=1,4221E-04$ $\alpha_2=-4,4468E-07$ $\alpha_3=-1,0659E-08$
3	-14,48	11,32	1	-	K=-2,461
4	53,3	2	1,755	51,1	
5	13,19	13,38	1	-	
6	17,61	1,5	1,755	51,1	
7	8,265	6,96	1	-	$\alpha_1=1,4221E-04$ $\alpha_2=-4,4468E-07$ $\alpha_3=-1,0659E-08$
8	45,195	1	2,001	19,3	
9	-24,42	0,2	1	-	
АД	∞	d10	1	-	
11	83,7	1	1,923	20,8	
12	9,027	2,8	1,497	81,6	
13	-11,25	0,5	1	-	$\alpha_1=1,4221E-04$ $\alpha_2=-4,4468E-07$ $\alpha_3=-1,0659E-08$
14	∞	d14	1	-	
15	30,81	4	1,697	55,5	
16	-12,10	0,7	1	-	$C_1=2,4951E-03$ $C_2=4,6962E-04$

17	∞	0,65	1,517	64,2	
18	∞	0,5	1	-	
19	∞	10,85	1,517	64,2	
Дисплей	∞	0,3	-	-	

Т а б л и ц а 3.12

ПАРАМЕТР	Поз 1	Поз 2	Поз 3
Размер экрана (дюйм)	14	28	42
d1 (мм)	110	220	330
d10 (мм)	0	0,132	0,168
d14 (мм)	0	-0,132	-0,168

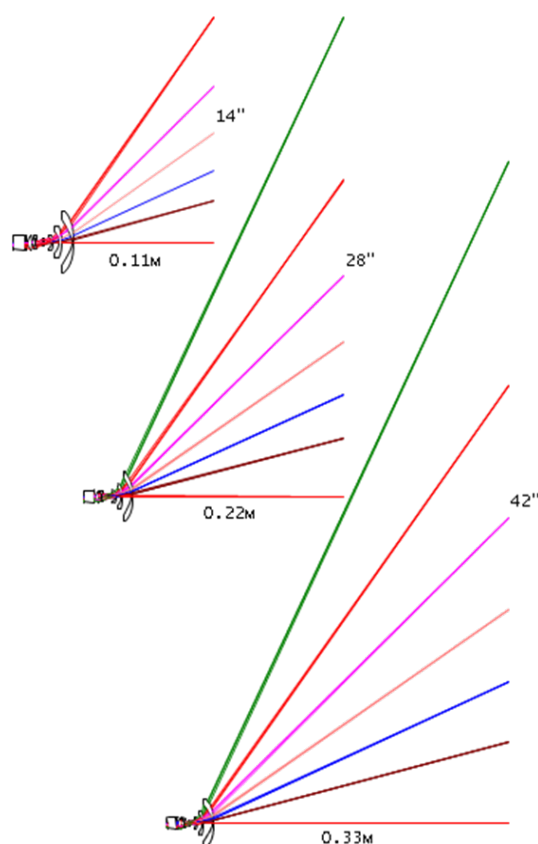


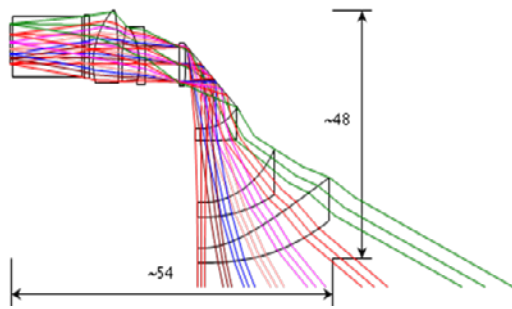
Рис. 3.16 ПРОЕКЦИОННОЕ РАССТОЯНИЕ И РАЗМЕР ЭКРАНА

Функция внутренней фокусировки в объективе осуществляется за счёт перемещения склеенной линзы.

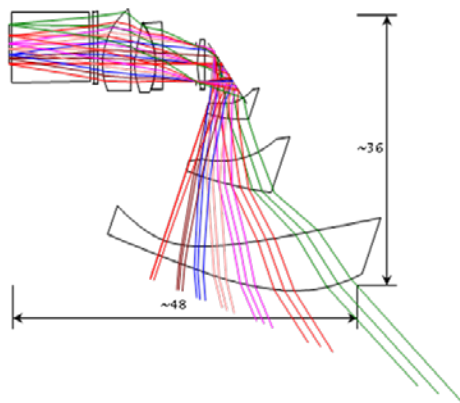
На рис.3.16 показано изменение проекционного расстояния от 0,11 м до 0,33 м при изменении диагонали экрана от 14 до 42 дюймов.

Введение в конструкцию объектива дополнительных зеркальных элементов позволяет изменять конфигурацию объектива в пространстве и даёт большую свободу при проектировании механики оптического модуля и его минимизации.

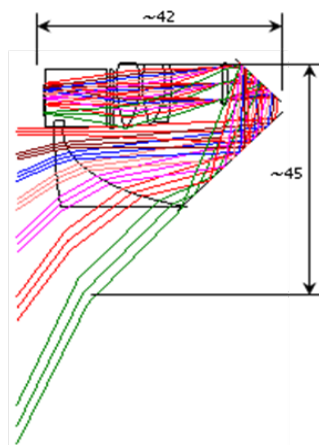
Примеры конфигураций объектива показаны на рис.3.17



a



b



c

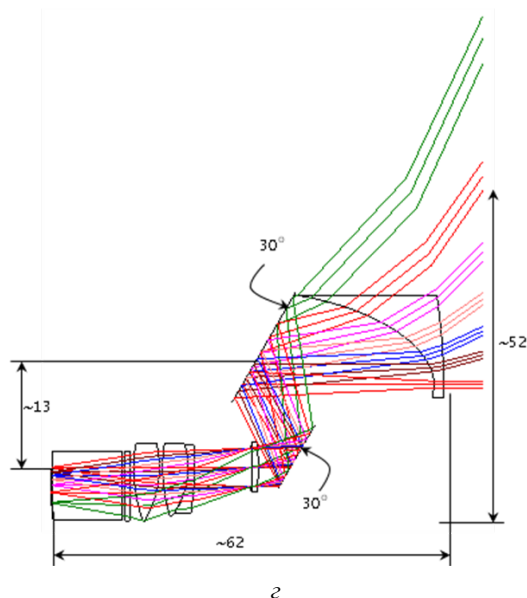


Рис. 3.17 ОБЪЕКТИВ С ЗЕРКАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

a – угол поворота 45°; *b* – угол поворота 30°;
v – угол поворота 45°x45°; *z* – угол поворота 30°x30°

3.11 ПАНОРАМНЫЙ ОБЪЕКТИВ КАК ОСНОВА ИНТЕРАКТИВНЫХ СИСТЕМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Панорамные оптические системы кругового обзора известны достаточно давно.

В связи с бурным развитием техники в последние годы наряду с традиционными приложениями – исследование космоса, мониторинг земной поверхности, охранные системы защиты, появились и новые применения – робототехника, навигация, бизнес, автомобили, игры, развлечения, спорт.

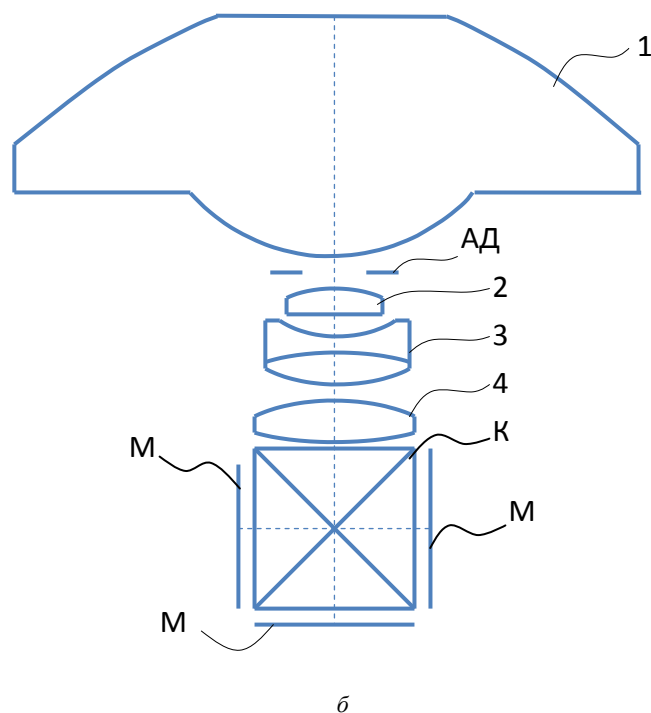
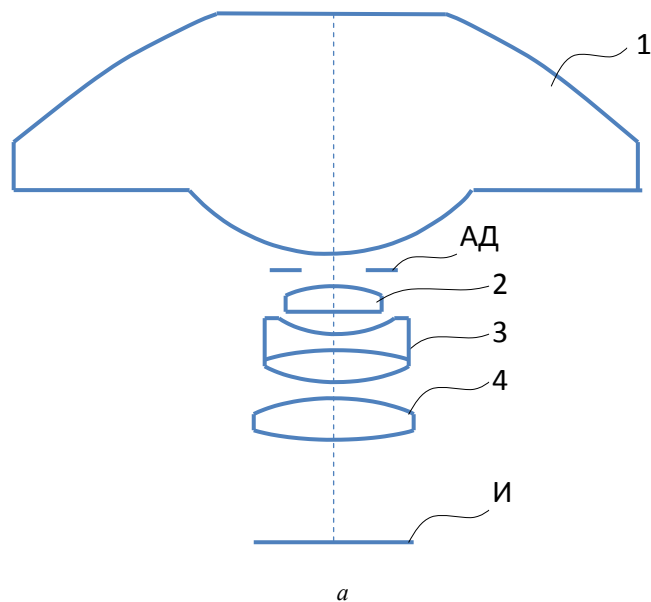
В частности, одним из последних направлений развития мультимедийных устройств стало создание интерактивных систем визуализации объектов, в которых используются различные методы получения так называемой «карты глубины» объектов и обработки 3-х мерного изображения пространства. Например, недавно компания Kinect запатентовала один из таких методов, который используется в датчике глубины (depth sensor). В состав устройства с угловым полем 60° входит инфракрасный проектор и камера слежения. Такое устройство применяется как игровая приставка к телевизорам.

3.11.1 ОРИГИНАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ФРОНТАЛЬНОГО ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО БЛОКА

На основе решения, описанного в работе профессора Соломатина В.А. [4], автором была предложена конструкция компактного зеркально-линзового объектива с углом обзора в 360°, который может быть применён как для проектора, так и для камеры.

На рис.3.18*a* приводится вид панорамной оптической системы, состоящей из 4х элементов, основу которой составляет зеркально-линзовый блок 1.

Цифрами 2,3 и 4 обозначены линзы, АД – апертурная диафрагма, К – светоделительный кубик, М – модулятор света (микродисплей), И – плоскость изображения (сенсор).



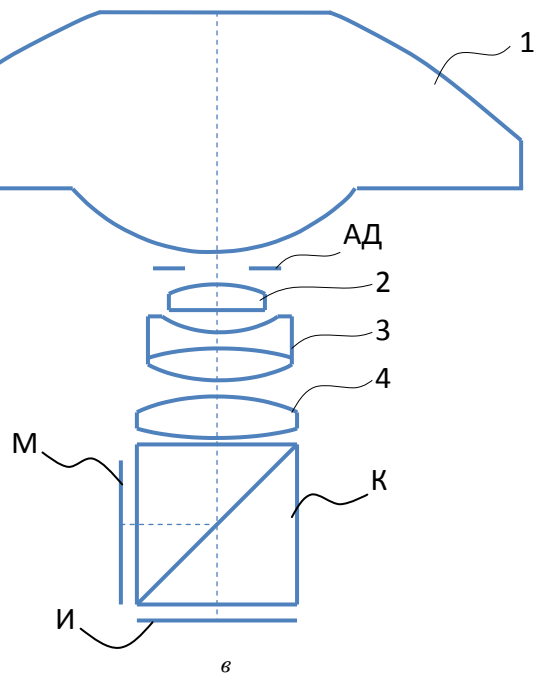
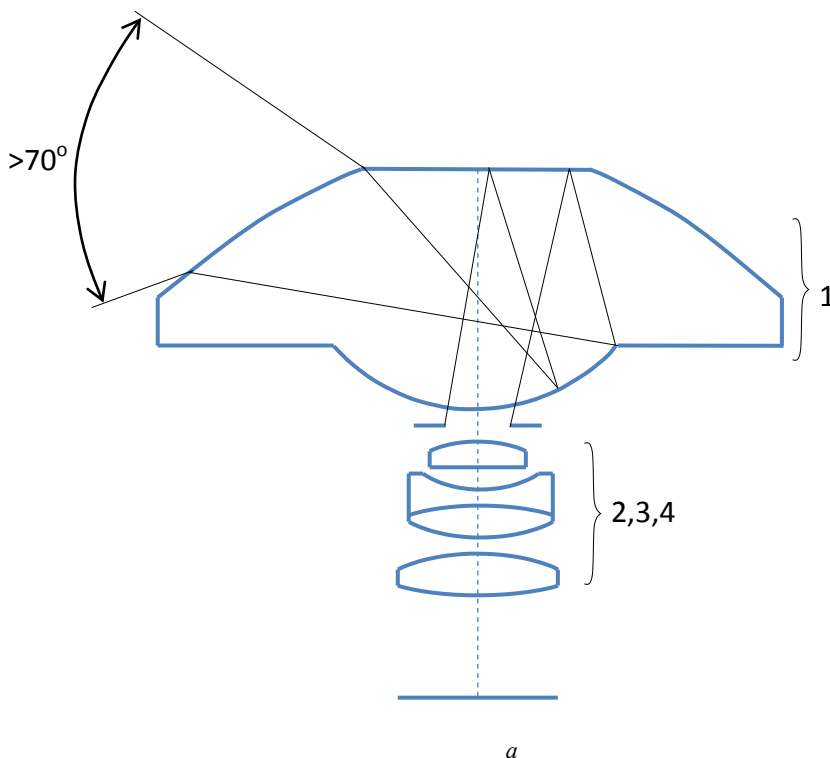


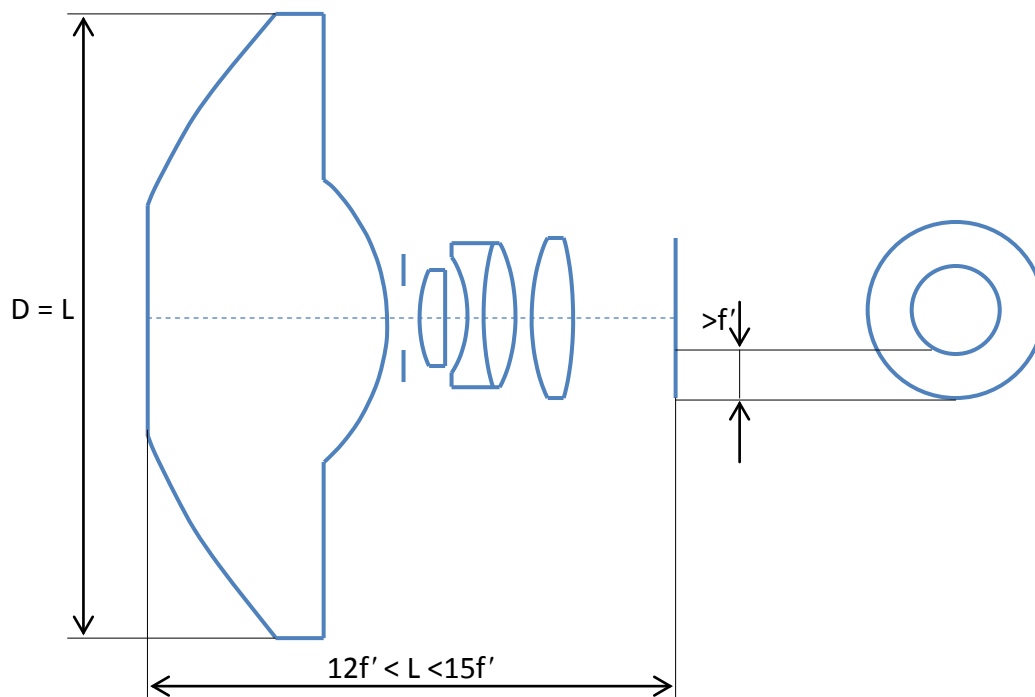
Рис. 3.18

a – панорамная камера; *б* – панорамный проектор;
в – панорамный датчик глубины

На рис.3.19*а* изображён ход лучей в панорамной оптической системе, на рис.3.19*б* – габаритные размеры и зона панорамного изображения на сенсоре.

Отличительной особенностью панорамного объектива является его простота и компактность. Фронтальный зеркально-линзовый блок имеет только три рабочих оптических поверхности, причём одна из них – плоскость. Длина объектива с фокусным расстоянием 2,5 мм и угловым полем $90 \div 210^\circ \times 360^\circ$ составляет всего 30 мм.





б

Рис. 3.19

3.11.2 ПАНОРАМНЫЙ ТЕЛЕКОНВЕРТЕР ДЛЯ КАМЕРЫ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Мировой рынок мобильных устройств продолжает расти. Высокая конкуренция заставляет производителей мобильных телефонов, цифровых камер, мультимедийных проекторов искать новые решения для расширения технических характеристик устройств и улучшения потребительских свойств.

При этом наблюдается тенденция к созданию универсальных продуктов, которые сочетали бы в себе различные функции – телефон – камера – проектор – сенсор. Активно развивается рынок различных аксессуаров и приставок, позволяющих придать базовым устройствам дополнительные возможности.

На примере мобильных телефонов можно видеть, как многие из них оснащены функцией автофокусировки, возможностью создания стереоскопических (3D) снимков, обладают способностью микроскопа, имеют переменное фокусное расстояние (оптический зум) или встроенный минипроектор.

На рис.3.20 представлен миниатюрный телеконвертер для камеры мобильного телефона, применение которого позволяет получить панорамные снимки.

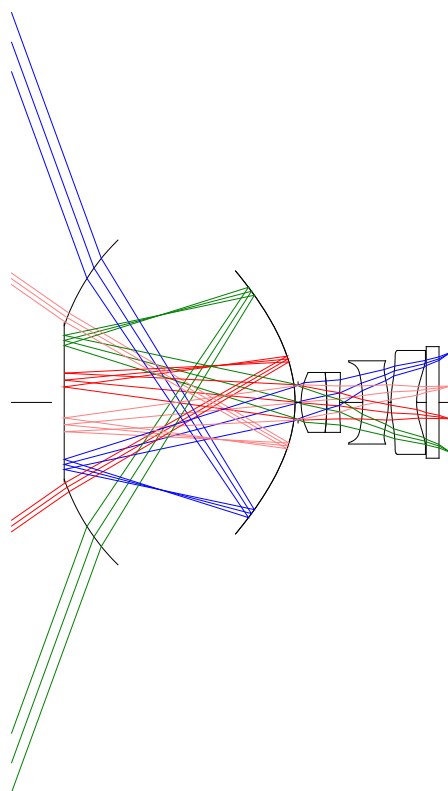


Рис. 3.20 ПАНОРАМНЫЙ ТЕЛЕКОНВЕРТЕР

Таблица 3.13

Параметр	Значение
Относительное отверстие	1:2,8
Формат матрицы	1/3,6"
Угловое поле	< 60°
Дисторсия	< 5 %
Длина	< 6 мм
Разрешение	100 лин/мм
Количество линз	4÷5

Таблица 3.14

Параметр	Значение
Относительное отверстие	1:2,8
Формат матрицы	1/3,6"
Угловое поле	60÷140°
Дисторсия	< 10 %
Длина	< 10 мм
Разрешение	100 лин/мм
Количество линз	1
Угловое увеличение	4 [×]

В табл.3.13-3.14 приведены основные параметры объектива камеры мобильного телефона и телеконвертера.

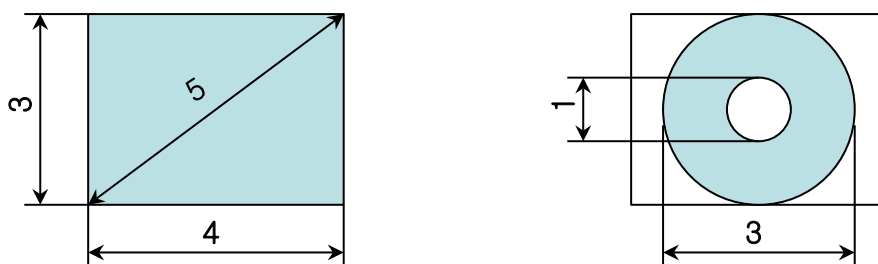


Рис. 3.21 Вид углового поля

На рис.3.21 показаны в мм размеры углового поля камеры (слева) и камеры с телеконвертером (справа).

3.12 МИНИАТЮРНЫЙ ПАНКРАТИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ С БОЛЬШИМ ПЕРЕПАДОМ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ. СХЕМА И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Проектирование миниатюрного панкратического объектива с большим перепадом фокусных расстояний является непростой задачей.

В табл.3.15 дана исходная спецификация «монохроматического квартета».

Таблица 3.15

Параметр	Величина
Спектр	$\lambda=0,587$ мкм (линия d)
Стекло	$1,49 < n < 1,92$
Число элементов	4
Длина по оси	Минимальная
Диаметр линз	≤ 8 мм
Форма поверхности линз	сфера или асферика
Воздушные промежутки	≥ 0
Качество изображения	$RMS < 0,07\lambda : y=1,25$ мм
Дисторсия	$< 5 \%$
Виньетирование	$< 50\%$
Апертурная диафрагма	Неподвижна
Фокусное расстояние	От 4 до 80 мм
Размер изображения	5 мм (диагональ)
Относительное отверстие	1:10
Задний фокус	> 16 мм

В результате было найдено решение, представленное на рис 3.22.

Объектив, построенный по формуле $p-n-p-p$, с плавным и непрерывным изменением фокусного расстояния имеет длину $\sim 64,16$ мм. В составе объектива – четыре линзы с пятью асферическими поверхностями, материал линз – стекло К8.

Задний фокальный отрезок > 16 мм, что вполне достаточно для размещения призмы, поляризационного кубика или дихроичного зеркала.

Конструктивные параметры объектива приведены в табл.3.16, переменные данные для шести значений фокусного расстояния – в табл.3.17.

Т а б л и ц а 3.16

№ поверхности	Радиус R мм	Толщина d мм	Показатель преломления n_d	Коэффициент дисперсии ν_d	Коническая постоянная k
Объект	∞	∞	1	-	
АД	∞	-7,6	1	-	
2	43,71	0,7	1,516	64,2	-6,525
3	-48,20	d3	1	-	
4	-17,50	0,3	1,516	64,2	
5	5,537	d5	1	-	-1,970
6	15,28	1,0	1,516	64,2	-2,635
7	-131,9	d7	1	-	
8	22,43	1,0	1,516	64,2	-5,431
9	-26,67	d9	1	-	-0,513
Изображение	-	-	-	-	

Т а б л и ц а 3.17

КОНФИГУРАЦИЯ	f^*	d3	d5	d7	d9
	мм				
I	4	0,400	37,576	7,193	15,942
II	10	3,501	15,148	18,003	23,459
III	20	8,777	8,393	10,670	33,716
IV	40	25,707	8,865	0,00	26,538
V	60	29,509	5,749	0,245	25,654
VI	80	34,123	2,937	8,102	15,994

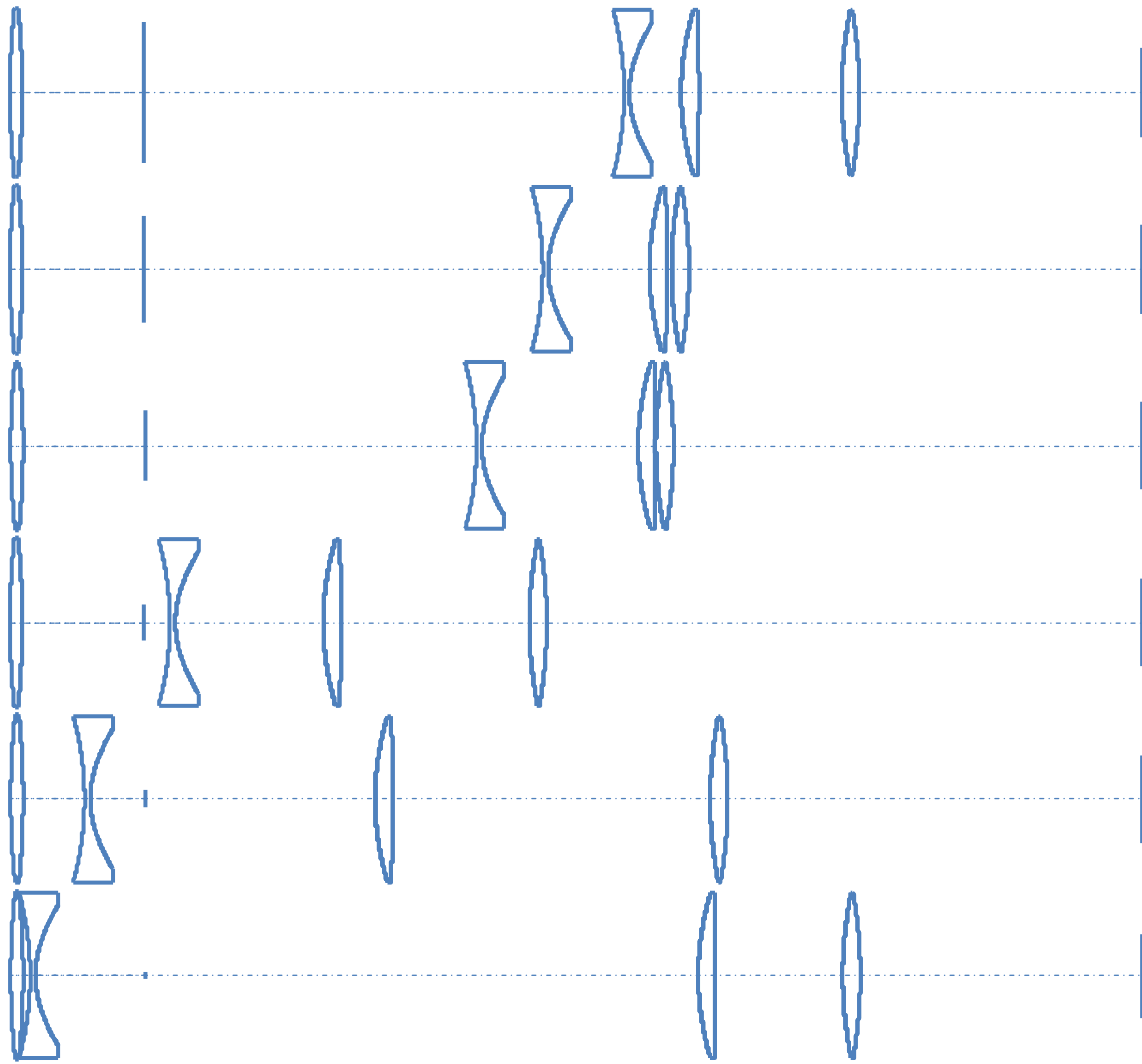


Рис. 3.22

3.13 МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ДИСТОРСИИ ПРИ СКАНИРОВАНИИ

3.13.1 ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ С ПЛАВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ

В проекционных дисплеях со сканированием луча на экране возникают дисторсионные искажения и расфокусировка изображения. Это связано с тем, что проекционное расстояние при сканирования постоянно меняется (при изменении от центра экрана к краю) и чем больше угол сканирования, тем сильнее проявляются искажения.

Существуют различные способы компенсации такого типа дисторсии – так называемой *f-theta distortion*.

В работе [27] автором было предложено компенсировать *f-theta* дисторсию в проекторе с одномерным сканирующим зеркалом при помощи проекционного объектива с переменным фокусным расстоянием (динамический метод). Суть метода заключается в плавном изменении линейного увеличения изображения на экране в процессе сканирования.

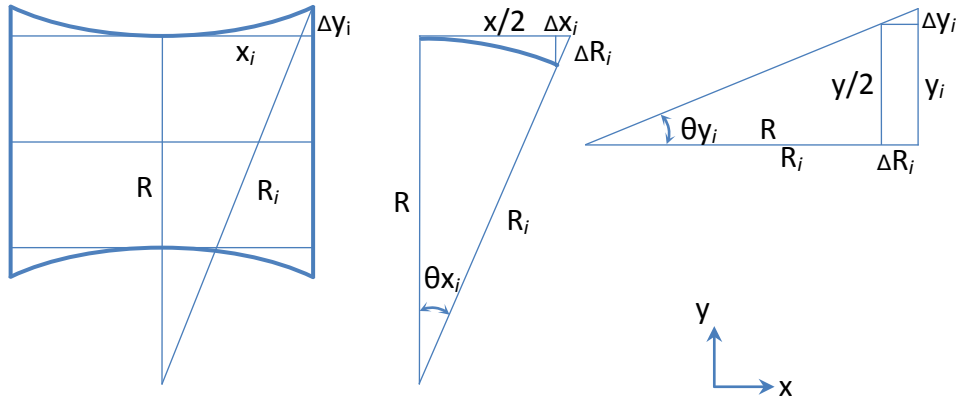


Рис. 3.23 К ОПРЕДЕЛНИЮ *F-THETA* ДИСТОРСИИ

На рис.3.23 обозначены основные параметры, необходимые для определения *f-theta* дисторсии:

y – высота экрана,

x – ширина экрана,

y_i – вертикальная координата сканирующего луча,

x_i – горизонтальная координата сканирующего луча,

R – проекционное расстояние при нулевом угле сканирования ($R_i=R$),

R_i – проекционное расстояние при сканировании,

θ_{x_i} – половина угла сканирования,

θ_{y_i} – половина углового поля объектива.

Пользуясь рис.3.23, запишем следующие выражения:

$$\Delta y_i = \Delta R_i \tan \Theta_{y_i} ; \quad \tan \Theta_{y_i} = \frac{y}{2R} \quad (3.52)$$

$$R_i^2 = x^2 + R^2 ; \quad x_i = R \tan \Theta_{x_i} \quad (3.53)$$

$$\Delta R_i = R_i - R \quad (3.54)$$

где

Δy_i – *f-theta* дисторсия в линейной мере,

ΔR_i – приращение проекционного расстояния при сканировании.

Используя формулы (3.53), выразим проекционное расстояние при сканировании R_i через угол сканирования θ_{x_i} :

$$R_i^2 = R^2 (1 + \tan^2 \Theta_{x_i}) \Rightarrow R_i = R \sqrt{1 + \tan^2 \Theta_{x_i}} \quad (3.55)$$

Подставляя значение R_i из (3.55) в выражения (3.52) и (3.54), получим:

$$\Delta R_i = R (\sqrt{1 + \tan^2 \Theta_{x_i}^2} - 1) \quad (3.56)$$

$$\Delta y_i = \frac{y}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \Theta x_i} - 1) \quad (3.57)$$

В параксиальном приближении запишем зависимость фокусного расстояния от угла сканирования:

$$f'_i = f' \sqrt{1 + \tan^2 \Theta x_i} \quad (3.58)$$

Напишем выражение для дисторсии в процентах:

$$\Delta y_i = 100 \times (\sqrt{1 + \tan^2 \Theta x_i} - 1) \quad (3.59)$$

Данные расчёта 3х-компонентного объектива с переменным фокусом [27] для 4х положений сканирующего зеркала сведены в табл.3.18, в которой угловые величины указаны в градусах, а линейные – в мм.

Таблица 3.18

Параметр	Θx_i	ΔR_i	Δy_i	f'_i	$\Delta y_i \%$
	0	0	0	20	0
$R=383$	7,428	3,242	0,645	20,17	0,846
$y/2=76,2$	10,400	6,397	1,273	20,33	1,670
$x/2=101,2$	14,857	13,247	2,636	20,69	3,459

3.13.2 СТАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО МНОГОЛИНЗОВОГО РАСТРА

В работе [41] автором было предложено компенсировать *f-theta* дисторсию в проекторе с одномерным сканирующим зеркалом при помощи цилиндрического многолинзового растра (рис.3.24), установленного между сканирующим зеркалом и экраном (статический метод).

В этом случае эквивалентное фокусное расстояние объектива проектора (в плоскости сканирования) меняется дискретно, пропорционально шагу растра.

Существенным недостатком статического метода являются aberrации, вносимые многолинзовым растром и которые необходимо устранять при расчёте объектива.

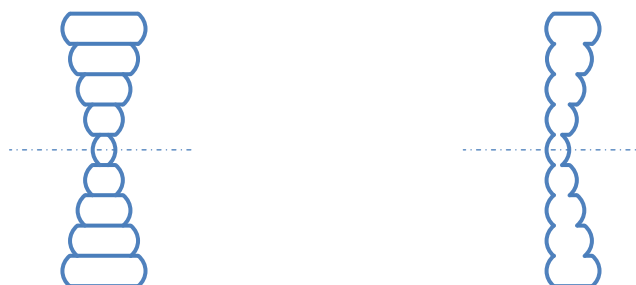


Рис. 3.24 Многолинзовый РАСТР

3.14 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТИВА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ZEMAX И CODE V

Современные программные комплексы расчёта оптических систем, такие как Zemax, Code V, предоставляют широкие возможности для моделирования оптических систем, их оптимизации, анализа качества изображения и расчёта допусков.

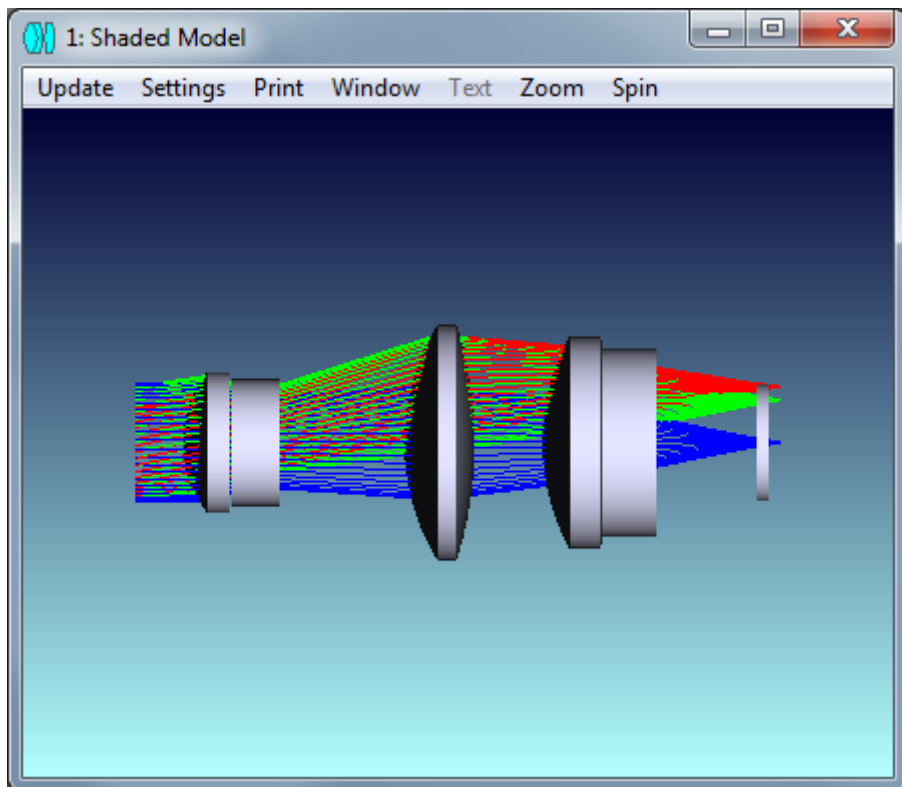
Таблица 3.19

Характеристика	Величина
Фокусное расстояние	12,5 мм
Относительное отверстие	1:2,5
Угловое поле	22,5°
Разрешение	100 штр/мм
Контраст	> 0,5
Дисторсия	< 5%
Диагональ экрана	10"
Проекционное расстояние	< 400 мм

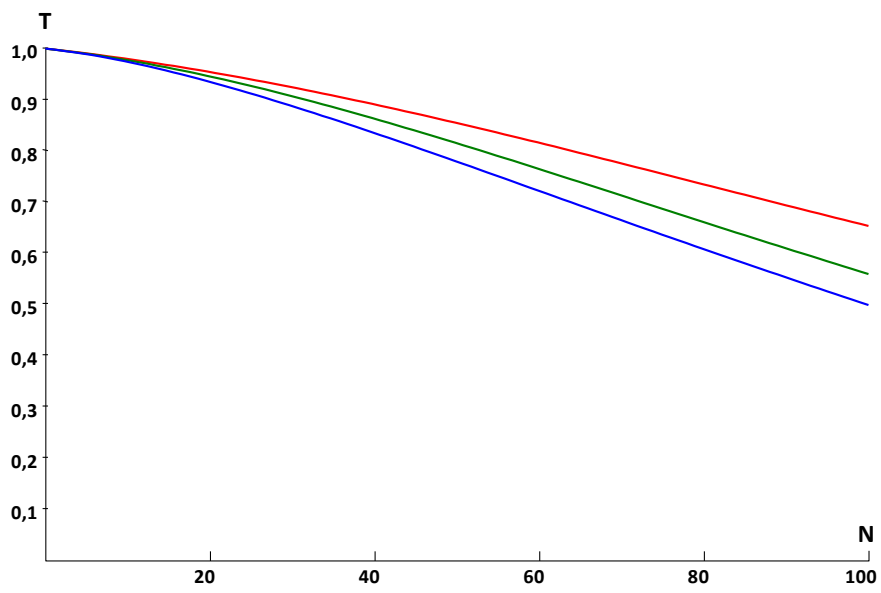
Рассмотрим анализ качества изображения и расчёт допусков на примере пятилинзового объектива минипроектора, характеристики которого приведены в табл.3.19.

На рис.3.25а, 3.25б представлен вид задания и 3х-мерная модель объектива в программе Zemax.

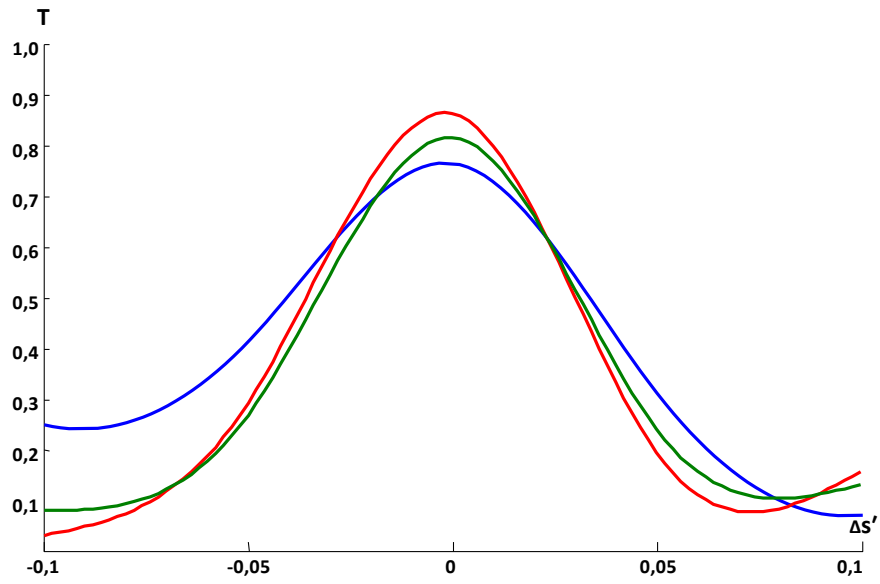
Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	396.000		78.642
STO	Standard	Infinity	2.002		2.500
2	Standard	4.835	1.700	LAK23	2.801
3	Standard	18.226	0.390		2.610
4	Standard	-70.583	1.000	N-KZFS11	2.575
5	Standard	4.008	6.326		2.355
6	Standard	9.611	3.000	N-PK52	4.473
7	Standard	-16.715	2.874		4.516
8	Standard	9.428	3.000	LASFN31	4.116
9	Standard	-19.730	0.242		3.662
10	Standard	-12.363	1.000	SF57	3.622
11	Standard	13.931	4.877		3.242
12	Standard	Infinity	0.500	BK3	2.513
13	Standard	Infinity	0.500		2.459
IMA	Standard	Infinity	-		2.379



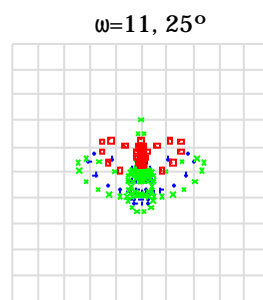
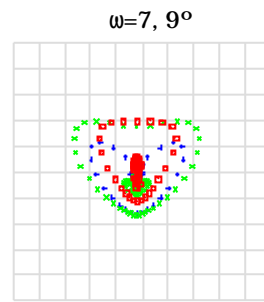
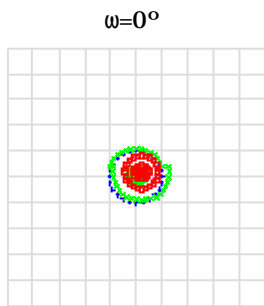
δ



δ



2



ϑ

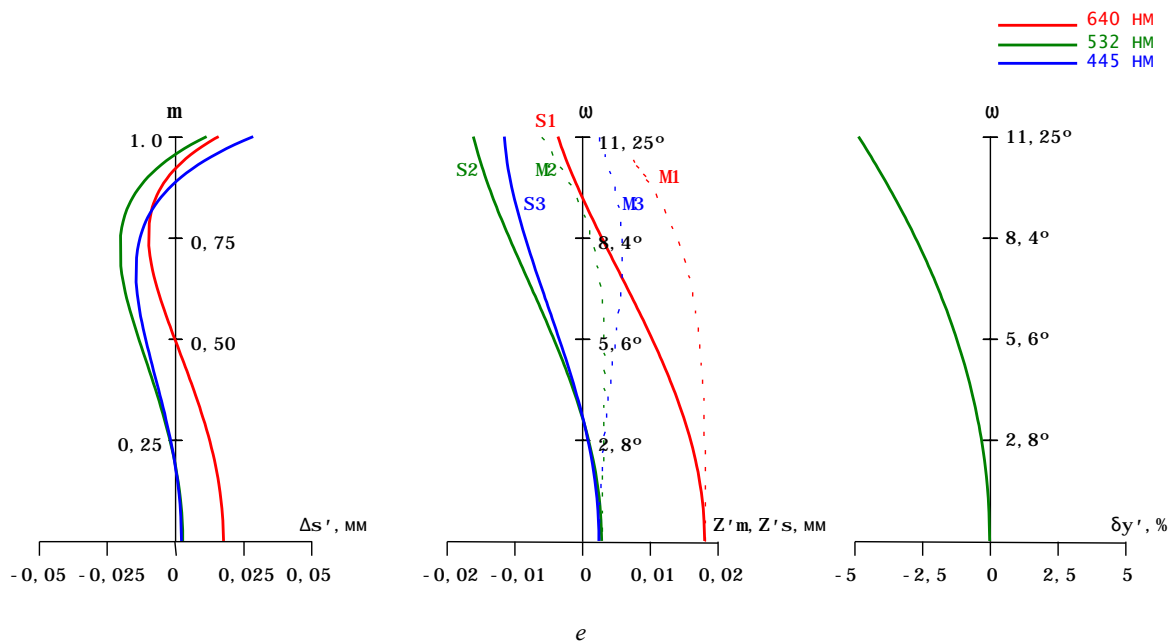


Рис. 3.25

a – окно редактора оптической системы; *b* – 3х-мерная модель объектива;
в – график оптической передаточной функции, *г* – график оптической передаточной функции при дефокусировке,
д – точечная диаграмма, *е* – графики продольного хроматизма, астигматизма, кривизны и дисторсии.
на графиках *в* и *г* обозначены: красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

Для оперативной оценки качества изображения оптической системы в процессе оптимизации удобней всего пользоваться различными графиками aberrаций.

График оптической передаточной функции на рис.3.25*в* показывает, что рассчитанный объектив имеет разрешение 100 лин/мм при контрасте 0,65 по центру поля и контрасте 0,5 – на краю углового поля, что является вполне приемлемой величиной для заданной в табл.3.19 спецификации.

На рис.3.25*г* представлен график оптической передаточной функции при дефокусировке, по которому можно оценить, как изменяется разрешение объектива (для 50 лин/мм) при смещении положения плоскости изображения в пределах $\pm 0,1$ мм.

Размер изображения точки (< 10 мкм) в зависимости от координаты поля зрения иллюстрирует точечная диаграмма на рис.3.25*д* (масштаб сетки на рисунке составляет 4 мкм).

Графики на рис.3.25*е* дают представление о величине продольного хроматизма и угловых aberrаций в объективе.

РАСЧЁТ ДОПУСКОВ

Расчёт допусков является важным и заключительным этапом проектирования оптической системы. В результате расчёта допусков можно определить наиболее чувствительные элементы оптической системы и, в конечном итоге, оценить, насколько реализуема рассчитанная оптическая система.

Прежде чем делать расчёт допусков в оптической системе, необходимо определить критерий (критерии) оценки качества изображения оптической системы, параметры компенсации и предельно допустимые значения конструктивных параметров (допуски на радиусы, толщины, форму поверхностей, децентрировку, дисперсию и показатель преломления).

Критерием оценки качества изображения в данном случае является величина оптической передаточной функции объектива, указанная в табл.3.19, график которой приведён на рис.3.25в.

В табл.3.20 указаны предельные значения конструктивных параметров для расчёта центрированной оптической системы. Линейные размеры указаны в мм, отклонения формы поверхности – в интерференционных кольцах.

Таблица 3.20

Параметр	Минимум	Максимум
Радиус поверхности R	0,02	-
Стрелка прогиба поверхности	0,002	0,05
Отклонение формы поверхности N	2	10
Местная ошибка ΔN	0,5	2
Толщина d	0,02	0,5
Показатель преломления, n_d	0,0001	0,002
Дисперсия, V_d	0,2	0,8

В табл.3.21 указаны предельные значения параметров для расчёта децентрированной оптической системы.

Таблица 3.21

Параметр	Минимум	Максимум
Клиновидность, мм	0,002	0,1
Наклон, рад	0,0003	0,005
Децентрировка, мм	0,02	0,5
Диаметр ролика, мм	0,02	0,5

Результат расчёта допусков центрированной оптической системы пятилинзового объектива приведён в табл.3.22.

Таблица 3.22

№ поверхности	Радиус R	Допуск ΔR	Форма N/ ΔN	Толщина d	Допуск Δd	Стекло n_d/ v_d	Допуск Δn_d	Допуск Δv_d
Экран	∞	-	-	396	-	-	-	-
АД	∞	-	-	2	0,5	1	-	-
3	4,834	0,005	2/0,5	1,7	0,02	1,6688/57,3	0,0005	0,8
4	18,22	0,1	2/0,5	0,39	0,02	1	-	-
5	-70,58	1,5	2/0,5	1	0,02	1,6378/42,4	0,0005	0,8
6	4,007	0,005	2/0,5	6,3	0,02	1	-	-
7	9,61	0,02	4/1	3	0,08	1,4970/81,6	0,0005	0,8
8	-16,71	0,06	10/2	2,8	0,02	1	-	-
9	9,42	0,04	8/2	3	0,02	1,8806/41,0	0,002	0,3
10	-19,73	0,04	2/0,5	0,24	0,005	1	-	-
11	-12,36	0,02	2/0,5	1	0,06	1,8466/23,8	0,002	0,3
12	13,93	0,1	10/2	4,87	0,1	1	-	-
13	∞	-	10/2	0,5	0,1	1,4983/65,0	0,002	0,8
14	∞	-	10/2	0,5	0,1	1	-	-
Дисплей	∞	-	-	-	-	-	-	-

Из табл.3.22 следует, что наиболее чувствительными параметрами оптической системы являются радиусы 3-ей и 6-ой поверхности с допуском $\pm 0,005$ мм, воздушный промежуток между 9-ой и 10-ой поверхностью с допуском $\pm 0,005$ мм и требования к форме изготовления поверхностей 3,4,5,6,10 и 11 ($N/\Delta N = 2/0,5$).

Результат расчёта допусков децентрированной оптической системы пятилинзового объектива приведён в табл.3.23.

Таблица 3.23

№ Элемента	R1 мм	R2 мм	Децентрировка мм	Децентрировка угл. мин	Наклон мм	Наклон угл. мин
1	4,834	18,22	0,002	1,3	0,0016	1,0
2	-70,58	4,007	0,002	1,5	0,0014	1,0
3	9,61	-16,71	0,002	0,7	0,003	1,0
4	9,42	-19,73	0,006	2,7	0,0023	1,0
5	-12,36	13,93	0,002	1,0	0,002	1,0
6	∞	∞	0,02	13,9	0,0248	17,2

Из табл.3.23 следует, что третий и пятый элементы объектива обладают наибольшей чувствительностью к децентрировке и на это следует обратить внимание при сборке, юстировке и контроле объектива.

Таблица 3.24

Угловое поле ω	Контраст $T_{рас}$	Контраст $T_{доп}$	d14
0°	0,65	0,55	0,232 мм
7,9°	0,55	0,36	0,232 мм
11,25°	0,50	0,49	0,232 мм

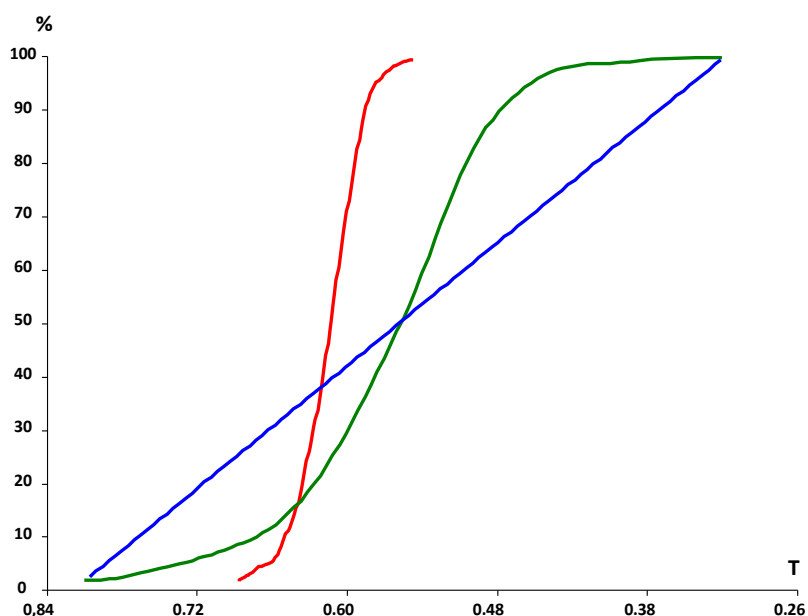


Рис. 3.26 Функция РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСКОВ

на графике: красным цветом – осевой пучок, зелёным – координата 0,7 и синим – край углового поля.

Влияние допусков на качество изображения при изготовлении пятилинзового объектива показано в табл.3.24, где обозначены: ω – половина углового поля, $T_{рас}$ – расчётный контраст, $T_{доп}$ – контраст оптической системы с допусками, d14 – диапазон компенсации.

График на рис.3.26 показывает, как будет изменяться оптическая передаточная функция в оптической системе 5-линзового объектива при Гауссовом распределении допусков.

Выводы по главе 3

1. На основе выведенного соотношения оптических сил компонентов в триплете может быть реализовано простое решение для осуществления внутренней фокусировки в объективе. Показано, что в объективе с таким сочетанием оптических сил может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка.

Полученные результаты легли в основу разработки объектива с фокусным расстоянием 35 мм и относительным отверстием 1:2.8, с угловым полем 45° и с ближней дистанцией фокусировки 0,5 м, который был сконструирован и запущен в серийное производство (рис.3.5).

2. Предложенные автором конструкторско-технологические решения, основанные на применении асферических, дифракционных элементов для коррекции aberrаций позволяют упростить конструкцию объектива, обеспечить высокое разрешение и создать оптический модуль минипроектора с размерами 6×8 см³ и толщиной менее 10 мм. Эти решения могут быть также использованы и при создании целого ряда оптических систем (фотокамеры, проекторы, микроскопы).

3. Оптический модуль с применением разработанных автором компактных объективов может быть интегрирован в современные портативные устройства (мобильный телефон, цифровую камеру, ноутбук).

4. На примере разработанных и представленных в главе 3 объективов было показано, что даже при минимальных габаритах могут быть улучшены оптические характеристики (светосила, угловое поле, разрешение) и расширены функциональные возможности (офсет, внутренняя фокусировка, переменное увеличение).

ГЛАВА 4. ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛИ МИНИПРОЕКТОРОВ

4.1 АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ И СПЕЦИФИКАЦИИ ТИПОВОГО МИНИПРОЕКТОРА

На рис.4.1 представлена типовая 3D модель оптического модуля DLP-проектора на светодиодах.

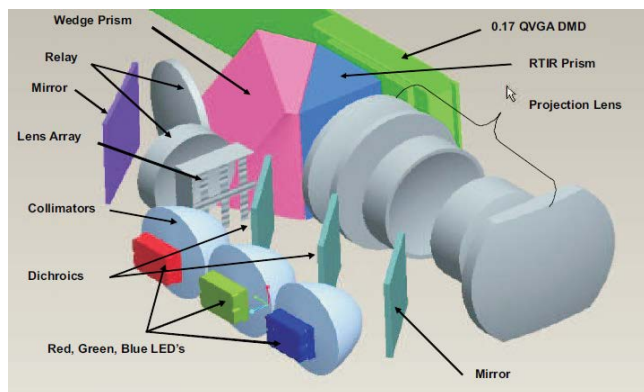
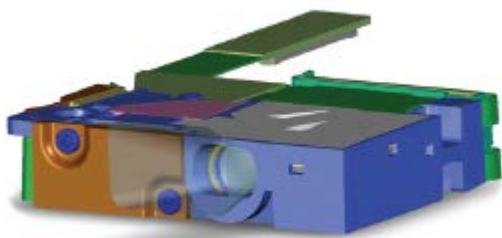


Рис. 4.1 ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ МИНИПРОЕКТОРА

На рис.4.2 показан вид и спецификация минипроектора для мобильного телефона, серийно выпускаемого компанией Sypro Optics. Толщина модуля не превышает 6 мм, объем 4 см³, а вес в сборе составляет не более 8 грамм. В качестве источников света в нём используются светодиоды и световой поток составляет ~ 10 люмен.



Параметр	Величина
Микродисплей	VGA
Размеры	29×22×6 мм
Объем	4 см ³
Вес	8 грамм
Световой поток	10 люмен
Контраст	1000:1
Офсет	100%

Рис. 4.2 МИНИПРОЕКТОР ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА

4.2 КОНСТРУКЦИЯ МИНИАТЮРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

После того как базовые элементы минипроектора (источники света, оптический модулятор – микродисплей, сканирующее зеркало) выбраны, а их технические параметры и

геометрические размеры определены, можно сделать предварительную оценку размеров оптического модуля.

На этом этапе проектирования важно добиться не только максимально компактной и «плотной» конфигурации оптического модуля, но и учесть возможность и доступность юстировки отдельных оптических элементов и узлов, а также контроля их выходных параметров.

Рис.4.3 иллюстрирует оптические схемы лазерного минипроектора, предложенные автором.

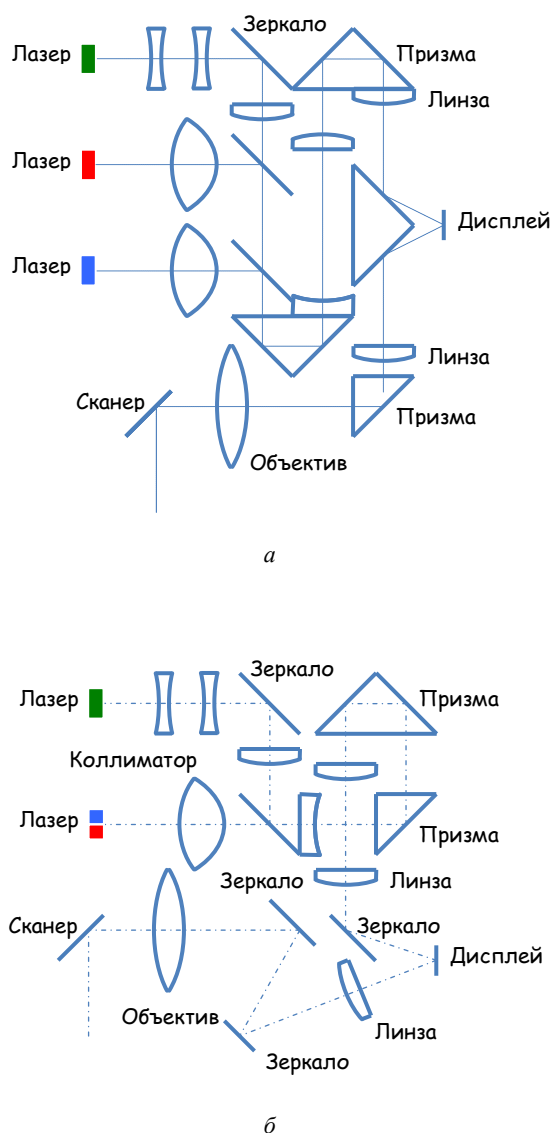
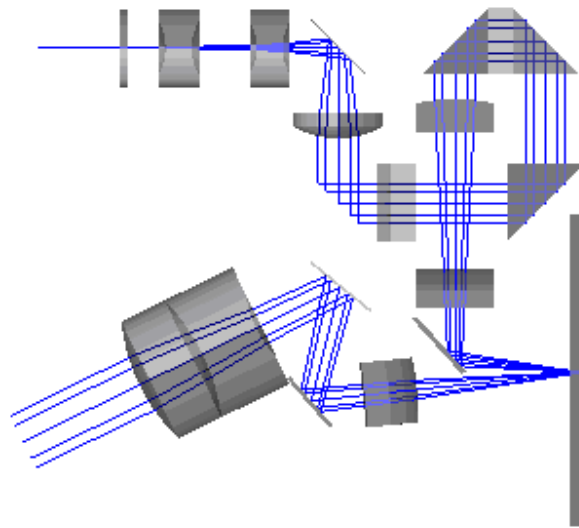
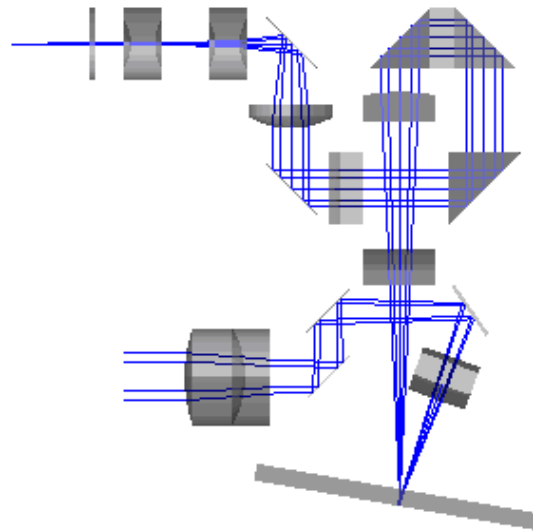


Рис. 4.3 ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОГО МИНИПРОЕКТОРА
а – конфигурация I; *б* – конфигурация II

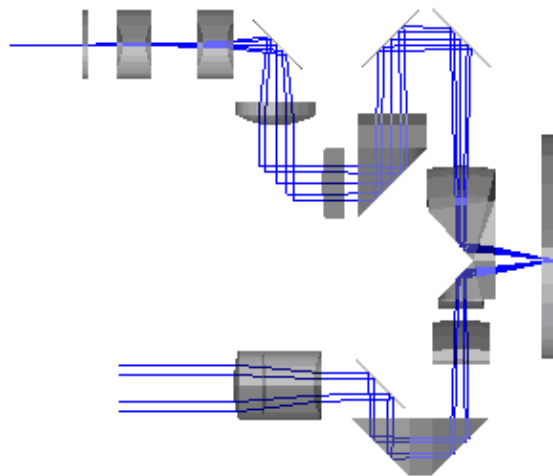
На рис.4.4 приведены примеры конструкции оптического модуля лазерного проектора, предложенные автором и предназначенные для встраивания в мобильный телефон.



a



б



в

Рис. 4.4 Оптический модуль лазерного минипроектора

Ход лучей во всех примерах показан для зелёного лазера. Конструкция модуля содержит отдельные элементы: линзы, зеркала и призмы.

Для достижения минимальных размеров модуля необходимо было определить наиболее оптимальное расположение оптических элементов и предусмотреть возможность контроля параметров световых пучков по ходу прохождения лучей и измерение их расчётных параметров (диаметр, форма, коллимированность пучков, равномерность и др.).

Варианты *а*, *б* и *в* на рис.4.3-4.4 отличаются расположением оптического модулятора, количеством призм и зеркал, углами наклона оптической оси.

Во всех случаях, показанных на рис.4.3-4.4, размер модуля составляет $\sim 30 \times 30$ мм.

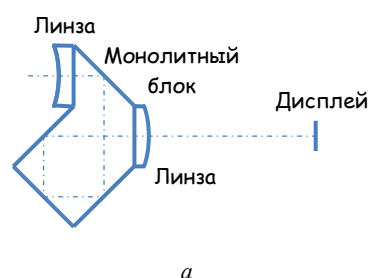
4.3 КОНСТРУКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ С МОНОЛИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

При конструировании минипроектора задача миниатюризации является приоритетной. С другой стороны, конструкция любого проектора включает большое количество оптических элементов и поверхностей – линз, призм, зеркал, выполняющих различные функции.

Установка, сборка и юстировка множества отдельных оптических элементов является достаточно сложным и трудоёмким процессом. А с учётом требований, предъявляемых к размерам современных миниатюрных проекторов, задача получения высокого качества изображения становится трудновыполнимой при применении традиционной конструкции оптической системы.

Одним из путей решения этой задачи могла бы стать разработка комбинированных, монолитных и планарных элементов, в которых взаимное расположение оптических поверхностей и точность изготовления определялись бы технологически, а для контроля выходных оптических характеристик не требовалось бы применять специальные измерительные устройства.

На рис.4.5 показаны примеры комбинированных элементов, предложенных автором, которые позволяют одновременно уменьшить размеры минипроектора и упростить сборку и юстировку оптического модуля.



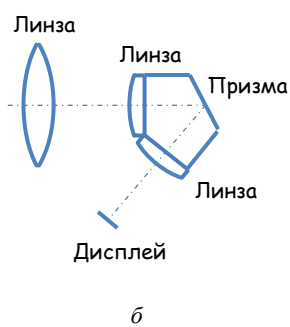


Рис. 4.5 КОМБИНИРОВАННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
a – генератор линии; *б* – объектив

В работах [28,31-33,42-45,50-51] автором были предложены различные варианты конструкции монолитных и планарных оптических элементов для минипроектора.

На рис.4.6 показаны примеры конструкции коллиматора зелёного лазера с малой расходимостью.

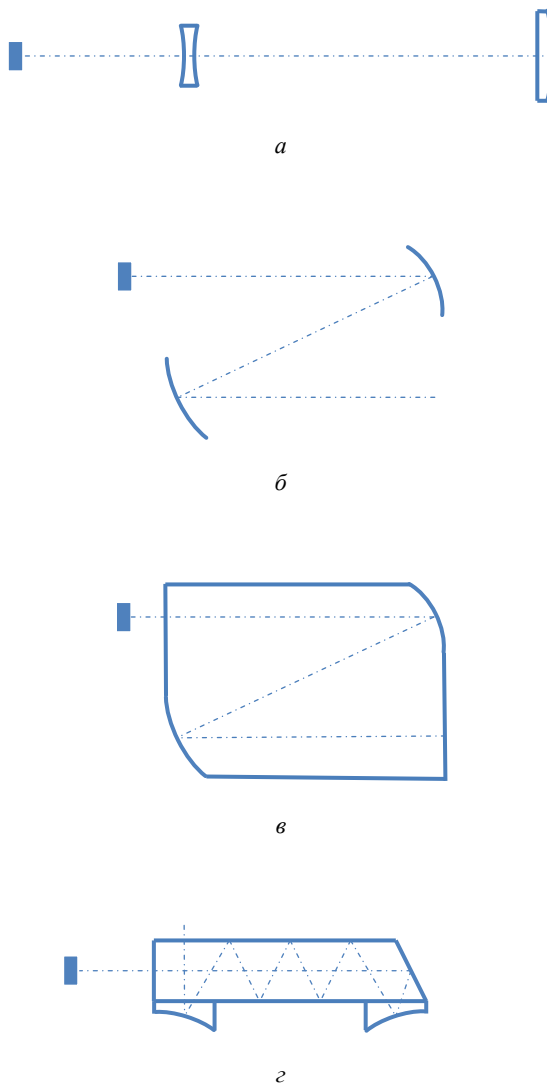
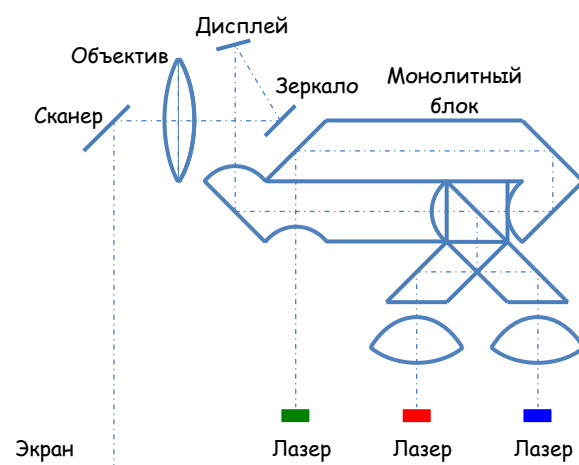


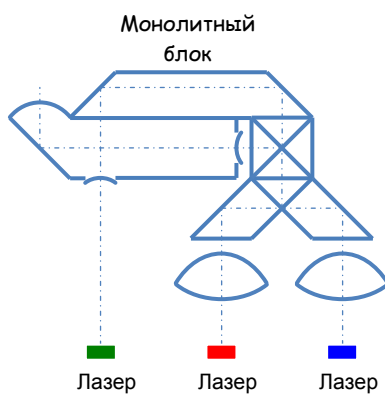
Рис. 4.6 КОЛЛИМАТОР
a – линзовый; *б* – зеркальный; *в* – монолитный; *z* – планарный

Применение монолитных элементов в конструкции значительно упрощает процесс сборки и юстировки сложной оптической системы минипроектора.

На рис.4.7 приведены оптические схемы минипроектора с монолитным блоком, описанные в работе [43]. Монолитный блок представляет собой комбинацию призм с зеркальными и линзовыми элементами, объединяющих световые пучки 3х лазеров и формирующих в плоскости дисплея световой пучок требуемой геометрической формы, с равномерным распределением освещённости и высокой эффективностью.

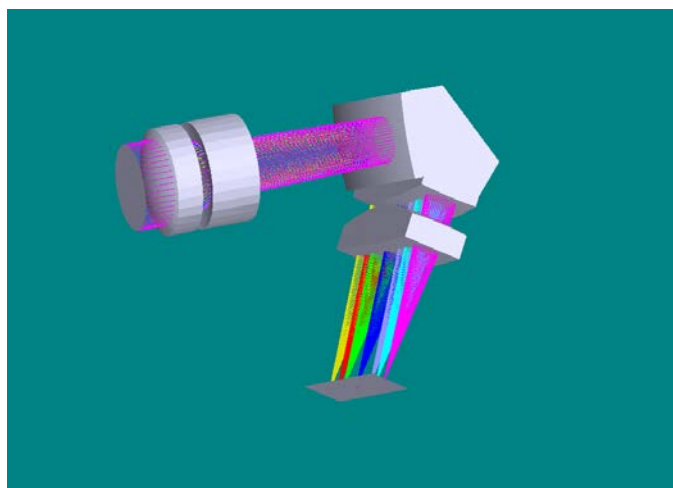
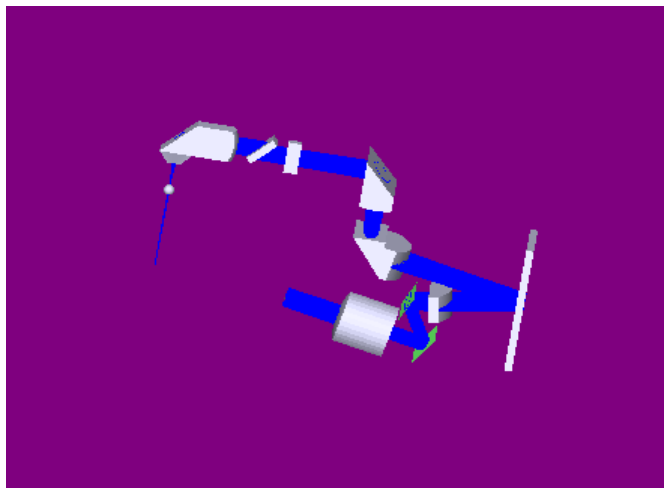
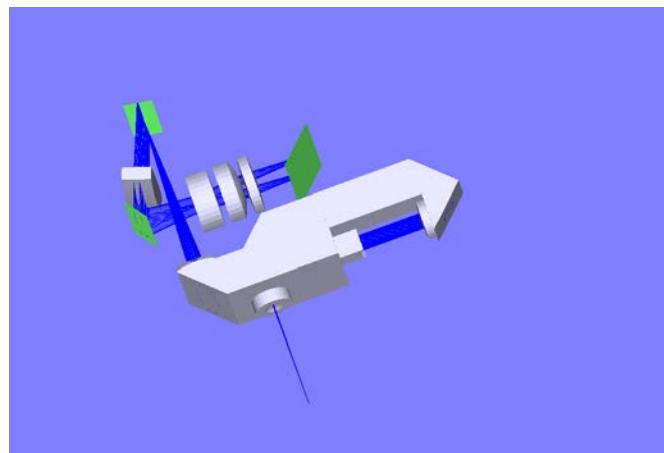
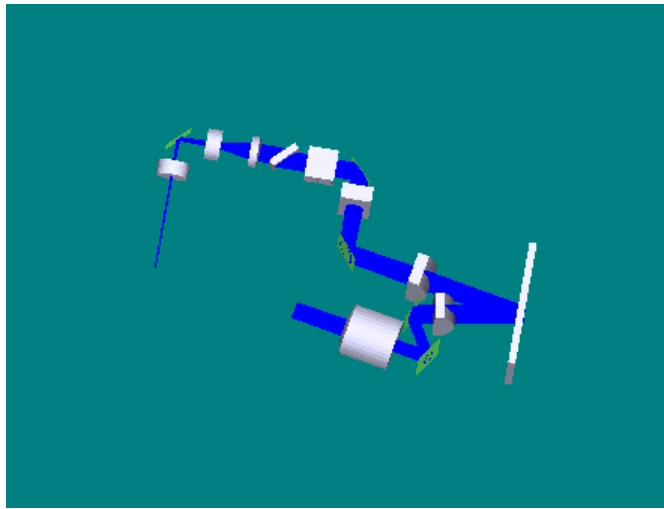


a



б

Рис. 4.7 ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ МИНИПРОЕКТОРА С МОНОЛИТНЫМ БЛОКОМ
a – конфигурация I; *б* – конфигурация II



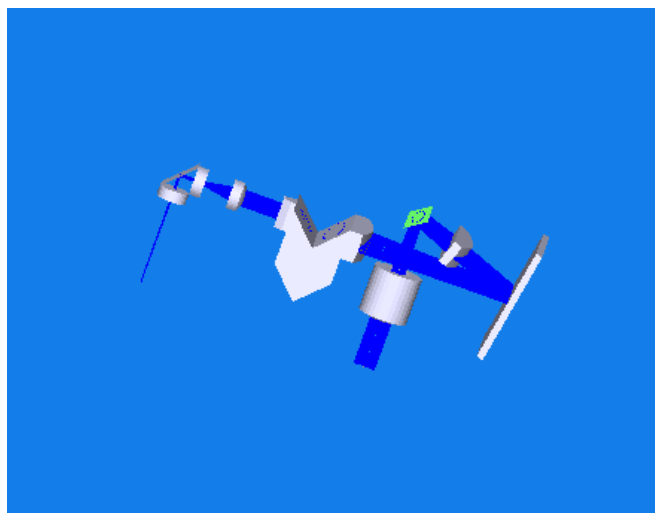


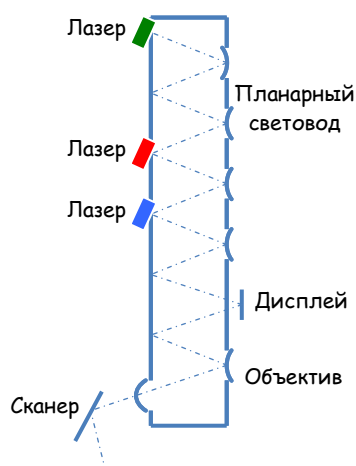
Рис. 4.8 ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛИ С МОНОЛИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

4.4 КОНСТРУКЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ПЛАНАРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

На рис.4.9 изображена схема минипроектора, предложенная автором в [48,51].

Проектор выполнен по планарной схеме, когда все элементы оптической системы расположены вдоль стеклянного световода (пластины). Свет от каждого лазера последовательно (сверху вниз) вводится через боковые грани световода, смешивается, коллимируется, преобразуется и фокусируется, отражаясь (по ходу прохождения лучей) от граней световода или от зеркальных элементов (площадок), сформированных на гранях световода. Наклон оптической оси в световоде рассчитан таким образом, чтобы свет при попадании на незеркальную поверхность испытывал эффект полного внутреннего отражения (TIR).

Излучение в виде тонкой линии шириной 10÷15 мкм падает на одномерный оптический модулятор (дисплей) и с помощью отражающих и преломляющих элементов, составляющих проекционный объектив, выводится на сканирующее устройство.



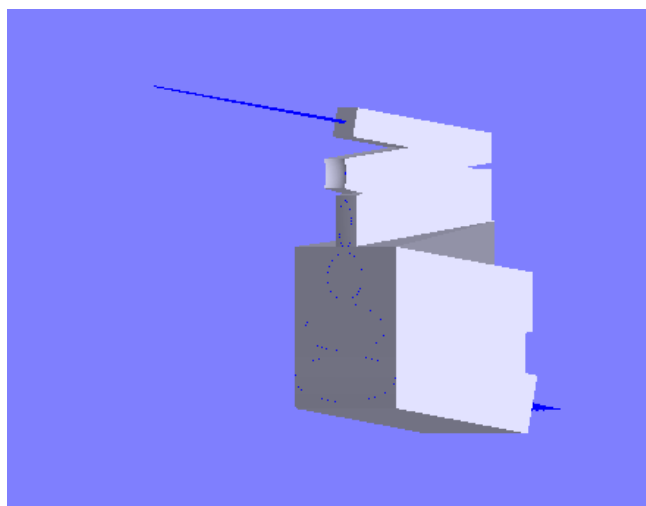
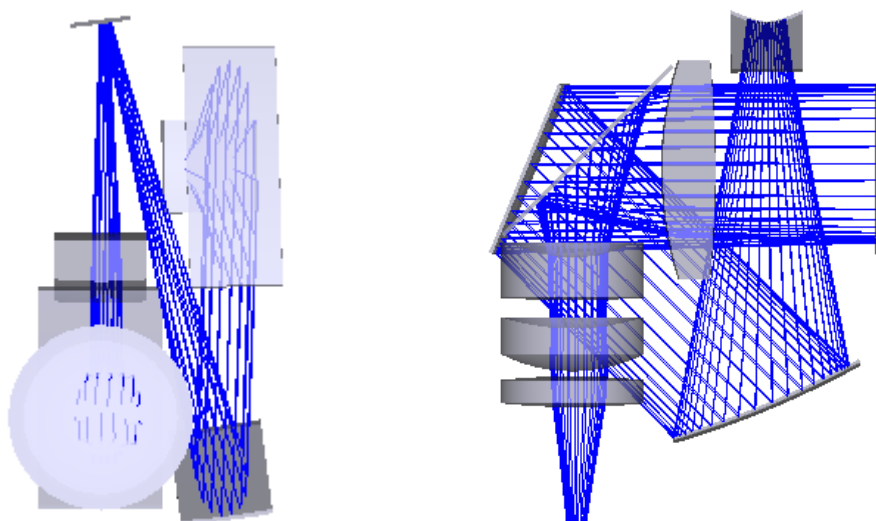


Рис. 4.9 ПЛАНАРНЫЙ МИНИПРОЕКТОР

Размеры световода могут составлять порядка нескольких миллиметров и будут зависеть как от требуемых характеристик микропроектора, габаритов отдельных элементов (лазерных диодов, дисплея, сканера), так и технологии изготовления.

4.5 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ 3Х-МЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Применение 3х-мерного проектирования, примеры которого показаны на рис.4.10 и представлены в работе автора [49] позволяют существенно сократить размеры оптических модулей.



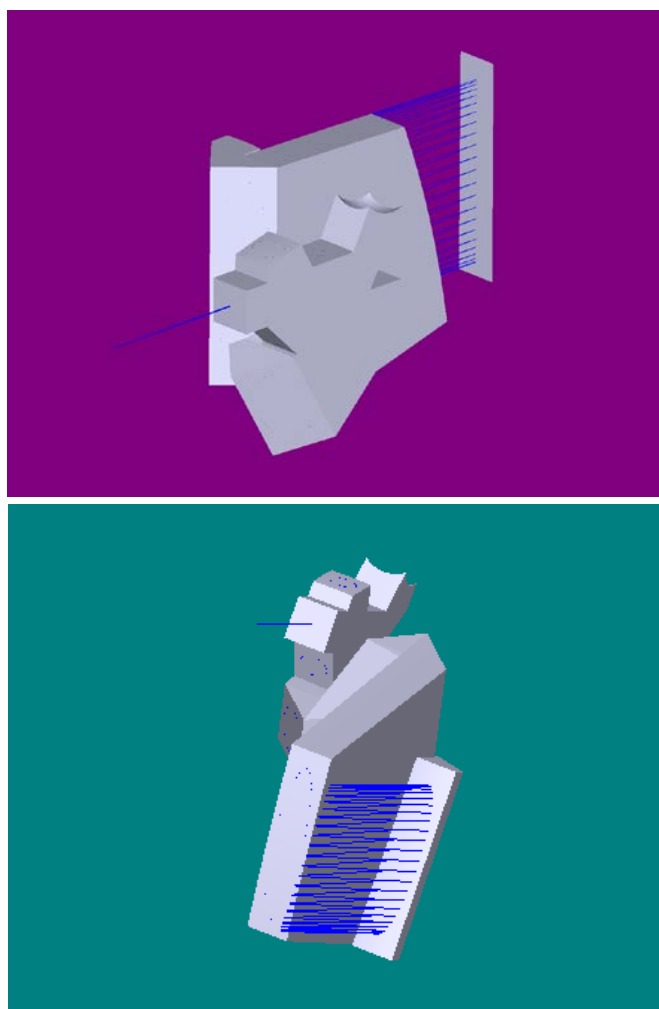


Рис. 4.10 Оптические модули с применением 3-х мерного проектирования

Выводы по главе 4

1. На этапе предварительной оценки размеров оптического модуля важно добиться не только максимально компактной и «плотной» конфигурации оптического модуля, но и учесть возможность и доступность юстировки отдельных оптических элементов и узлов, а также контроля их выходных параметров.

2. Одним из путей решения задачи миниатюризации является разработка комбинированных, монолитных и планарных элементов, в которых взаимное расположение оптических поверхностей и точность изготовления определялись бы технологически, а для контроля выходных оптических характеристик не требовалось бы применять специальные измерительные устройства.

3. Разработанные автором конструкции оптических модулей с применением монолитных и планарных элементов, с использованием 3х-мерного проектирования обеспечивает их минимальные габариты и возможность интегрирования в современные портативные устройства (мобильный телефон, цифровую камеру, ноутбук).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрены проекционные дисплейные технологии, определены направления и перспективы их развития.

Мобильные проекционные устройства с каждым годом совершенствуются, и в этой связи растёт необходимость в улучшении их потребительских свойств: увеличение яркости и повышение разрешения на экране, снижение энергопотребления, сокращение цены устройства. Поэтому развитие дисплейных технологий, таких как MEMS, MOEMS, наряду с разработкой новых сверхярких светодиодов и лазеров открывает всё большие возможности для создания компактных минипроекторов и разработки цифровых проекционных систем высокого разрешения.

Встраивание минипроекторов в индивидуальные портативные устройства позволяет оснастить устройство дополнительными функциями и использовать мобильный телефон, смартфон или планшет в качестве проектора для наглядных презентаций во время деловых встреч.

Такие проекторы предоставляют прекрасные возможности для оперативного просмотра мультимедийной информации в обычных условиях, не требующих специальных экранов – для воспроизведения изображения достаточно воспользоваться любой плоской поверхностью – будь то стол в кафе, откидной столик в самолёте или в автомобиле. Минипроекторы активно используются для популярных в наше время 3D видеоигр, а также при занятиях спортом.

В последнее время дисплейные технологии стали применяться и в автомобилях. Наряду с применением в традиционных системах индикации и навигации, матрицы MEMS встраиваются в конструкцию осветительных систем автомобилей. Когда, при постоянно меняющихся внешних факторах: погодных условий, дорожной обстановки, интенсивности встречного движения, неожиданных помех, возникающих на пути движения автомобиля, - необходимо иметь автоматическую систему управления светом фар автомобиля.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертации **решена актуальная научно-техническая задача**, имеющая важное практическое значение – разработаны теоретические аспекты и конструкторско-технологические решения, обеспечивающие миниатюризацию проекционных оптических систем, применяемых в современных мобильных устройствах, и увеличение их разрешающей способности.

При решении этой задачи:

1. Разработаны осветительные системы минипроекторов с применением методов миниатюризации и методов преобразования излучения лазерных диодов.

2. Разработаны оригинальные оптические схемы компактного, светосильного и комбинированного объективов, объектива с офсетом и внутренней фокусировкой, широкоугольного объектива с ультракоротким проекционным расстоянием, панорамного зеркально-линзового объектива, миниатюрного объектива с переменным фокусным расстоянием.

3. Разработаны многофункциональные, комбинированные, монокристаллические и планарные оптические элементы.

4. Разработаны варианты конструкций оптических модулей минипроекторов.

Указанные разработки теоретически обоснованы, защищены 24 патентами, доведены до конкретных инженерных рекомендаций и внедрения в серийные образцы современной оптической проекционной техники и технологии.

В выводах по главам диссертации содержатся **практические рекомендации** по выбору оптимальных схем миниатюрных проекционных систем в зависимости от установленных конструкторско-технологических факторов, а также определены **перспективные направления развития** таких систем в связи с разработанными в диссертации методиками расчета основных элементов минипроекторов и совершенствованием их элементной базы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

DLP – Digital Light Process – цифровая обработка света

DMD – Digital Micromirror Device – цифровое микрозеркальное устройство

SLM – spatial light modulator – пространственный модулятор света

GLV – Grating Light Valve – дифракционный оптический модулятор

GEMS – Grating Electro-Mechanical System – дифракционная электро-механическая система

MEMS – Micro-Electro-Mechanical System – электро-механическая микрозеркальная система

MOEMS – Micro-Optical- Electro Mechanical System – микрооптическая электро-механическая система

SSL – Secure Sockets Layer – протокол защищённых схем

LCD – Liquid Cristal Display – жидкокристаллический дисплей

LCoS – Liquid Cristal on Silicon display – жидкокристаллический дисплей на силиконе

Pico Projector – миниатюрный проектор

PDA – Pocket Digital Assistant – компактное цифровое устройство

HMD – Head Mounted Display – нашьлемный дисплей
LED – Light Emitted Diode – светоизлучающий диод
LD – Laser Diode – лазерный диод
OPS – Optically Pumped Semiconductor laser – полупроводниковый лазер
с оптической накачкой
RGB – Red, Green, Blue color – красный, зелёный, синий цвет
STOP – апертурная диафрагма
IP – image plane – плоскость изображения
TIR – total internal reflection – полное внутреннее отражение
X-cube – поляризационный куб
PBS – polarizing beam splitter – поляризующий расщепитель пучка
DM – dichroic mirror – дихроичное зеркало
VGA – Video Graphics Array (640×480) – цифровой формат разрешения в пикселях
HVGA – Half-size VGA (640×240)
QVGA – Quarter VGA (320 × 240)
WVGA – Wide VGA (800×480)
SVGA – Super VGA (800×600)
Full HD (HDTV) – Full High Definition (1920x1080) – цифровой формат телевидения
высокой чёткости
MTF – modulation transfer function – оптическая передаточная функция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Можаров Г.А. Основы геометрической оптики. М.: Издательский дом ЛОГОС. 2006.– 280с
2. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. Л.: Машиностроение. 1969. – 671с
3. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение. 1975. – 640с
4. Соломатин В.А. Панорамная видеокамера // Оптический журнал. Т.74. – 2007.– №12. – с.30-33
5. Теория оптических систем. Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н.П. Заказов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. – 3-е изд., Машиностроение. 1992.– 448с
6. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение. 1966. – 565с
7. Шишкин И.П. Компактные объективы миниатюрных проекторов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2012. – №3. – с.115-119

8. Шишкин И.П. Триплет с внутренней фокусировкой // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – №3 – с.
9. J.A.Hoffnagle, C.M.Jefferson. Refractive optical system that converts a laser beam to a collimated flat-top beam. US6295168
10. J.A.Hoffnagle, C.M.Jefferson. Beam shaping with a plano-aspheric lens pair. Opt. Eng. 42(11). 3090–3099 (2003)
11. D.A.Shealy, J.A.Hoffnagle. Laser beam shaping profiles and propagation. Appl. Opt. 45. 5118-5131 (2006)
12. D.A.Shealy, J.A.Hoffnagle. Optical system for variable resizing of round flat-top distributions. Proc. of SPIE Vol. 6290 (2006)
13. J.Agostinelli, M.W.Kowarz, D.Stauffer, T.Madden, and J.G. Phalen. GEMS: A Simple Light Modulator for High-Performance Laser Projection Display. SID Symposium Digest (2006)
14. Marcel P.C, M. Krijn, B.A.Salters. LED-based mini-projectors. Proc. of SPIE Vol. 6196 (2006)
15. J.Duparre and Reinhard V. Novel Optics/Micro-Optics for Miniature Imaging Systems. Proc. of SPIE Vol. 6196 (2006)
16. Y.Meuret, B.Vangiel. Efficient illumination in LED-based projection systems using lenslet integrators. Proc. of SPIE Vol. 6196 (2006)
17. E.Geißler. Meeting the Challenges of Developing LED-based Projection Displays. Proc. of SPIE Vol. 6196 (2006)
18. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Samsung Optical Modulator (SOM) as the Light Modulator for Next Generation Display Applications. SAMSUNG Tech Conference 2006
19. M. Scholles, A.Bräuerb. Ultra compact laser projection systems based on two-dimensional resonant micro scanning mirrors. Proc. of SPIE Vol. 6466 (2007)
20. M.Jansen, G.P.Carey, R.Carico, R.Dato. Visible Laser Sources for Projection Displays. Proc. of SPIE Vol. 6489 (2007)
21. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Design and Image Processing of Novel Diffractive Optical Modulator for Embedded Module Display Applications. Conference on Laser and Electro-Optics/Pacific Rim. OSA (2007)
22. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Spatial optical modulator (SOM): high density diffractive laser projection display. Proc. of SPIE Vol. 6487 (2007)
23. G.Ouyang and K.Li. A compact LED color mixing scheme with the etendue of a single chip. Proc. of SPIE Vol. 6670 (2007)
24. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Display device using single panel light modulator. US2007229924

25. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Display device using single panel light modulator. JP2007272233
26. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Beam shaper. KR20080058001
27. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Displaying apparatus for correcting image distortion. KR100808100
28. I.Shyshkin, K.Y.Oh. A beam conversion apparatus. KR20080098255
29. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile applications. Proc. of SPIE Vol. 6887 (2008)
30. S.Masaaki, Y.Chung Mo, I.Shyshkin. Light axis adjusting apparatus and projection display apparatus using light axis adjusting apparatus thereof. KR20080072399
31. I.Shyshkin. Monolithic collimator. KR20080098971
32. H.S.Yang, I.Shyshkin. Line beam generator. KR100863196
33. I.Shyshkin. Projection apparatus. KR100872571
34. Duanfeng He, Miklos Stern. Compact image projection arrangement with correction for laser beam angular misalignment. US20080204669
35. H.Grüger, J.Knobbe, M.Scholles. New Approach for MEMS Scanning Mirror for Laser Scanning Mirror for Laser Projection Systems. Proc. of SPIE Vol. 6887 (2008)
36. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications. Proc. SPIE Vol. 6887 (2008)
37. M.Nielsen, R.Sprague, J.Miller. Scanning Laser Beam Displays. Proc. of SPIE Vol. 7001 (2008)
38. J.Pan,* S.Tu, C.Wang, and J.Chang. High efficiency pocket-size projector with a compact– projection lens and a light emitting diode-based light source system (2008)
39. The Pico projectors & Light Engine Report. Yole Development (2008)
40. K.Guttag, J.Lund and C.Waller. 854x600 Pixel LCOS Microdisplay with 5.4um Pixel Pitch for Pico-Projectors. Syndiant Inc.(2008)
41. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Display device using diffractive light modulator and having image distortion function. US2008036974
42. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Monolithic lighting device. US2008205470
43. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Miniature color display apparatus. US2008212037
44. I.Shyshkin, C.G. Kim, K.Y.Oh. Illumination optical apparatus. US2008266862
45. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Projection lens. US2008285160
46. D.Darmon, J.R.McNeil and M.A.Handschy. LED-Illuminated Pico Projector Architectures. ISSN0097-966X/06/3701© 2009 SID
47. I.Shyshkin. Light projection apparatus and display apparatus using it. KR20090014900
48. I.Shyshkin. Light guide plate and display apparatus using it. KR20090014916
49. I.Shyshkin. Catadioptric monolithic line beam generator. KR20090014919

50. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Monolithic beam expander. KR20090015478
51. I.Shyshkin. Lighting guide plate. KR20090015735
52. I.Shyshkin. Laser module having aspheric collimate lens. KR20090029565
53. I.Shyshkin. Hybrid apochromatic lens. KR20090080445
54. I.Shyshkin. Projection lens. KR20090130964
55. T-L.Hsu, C-H.Huang. Projection lens system. US20090316276
56. M.Brown. Scanning laser projector with reduced laser power incident on retina. US2009066916
57. J.Miller, R.James. MEMS based projector having a prism. US2009141244
58. W.L.Coggshall. Opportunities for New Era Projectors. Proc. of SPIE Vol. 7232 (2009)
59. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. SOM-based projection module for mobile displays. Journal of the Society for Information Display. June 2010
60. J.Khaydarov, S.Essaiana, G.Nemeta. Highly-Efficient and Compact Microchip Green Laser Source for Mobile Projectors. Proc. of SPIE Vol. 7582 (2010)
61. J.Tauscher, W.O.Davis, D.Brown. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics. Proc. of SPIE Vol. 7594 (2010)
62. I.Shyshkin. Projection lens for embedded pico projector. SAMSUNG Tech Conference (2010)
63. A.Cable. Interactive experience. Nature photonics Vol. 4. November 2010
64. S.Roelandta, L.Bogaerta. Color uniformity in compact LED illumination for DMD projectors. Proc. of SPIE Vol. 7723 (2010)
65. I.Shyshkin. Illumination optics for embedded pico projector. SAMSUNG Tech Conference (2010)
66. S.Morgott, S.Groetsch. LED light sources for mobile embedded projection. Proc. of SPIE Vol. 7723 (2010)
67. I.Shyshkin, S.Masaaki. Zoom expander. KR20100048092
68. I.Shyshkin. Wide angle projection lens. KR20100048123
69. I.Shyshkin. Illumination apparatus. KR20100048125
70. I.Shyshkin, S.K.Yun. Relay lens and display device including the same. KR20100060977
71. A.Laskin, G.Williams, A.Demidovich. Applying refractive beam shapers in creating spots of uniform intensity and various shapes. Proc. of SPIE Vol. 7579 (2010)
72. M.Niستن, T.Masood et al. Scanning Laser Beam Displays based on a 2-D MEMS. Proc. of SPIE Vol. 7723 (2010)
73. A.Laskin, G.Williams et al. Applying refractive beam shapers to improve other beam shaping techniques. Proc. of SPIE Vol. 7789 (2010)

74. M.Handshy, C.Berliner. Polarization Conversion and Color-Combination Techniques for Pico Projector Illuminators. US2010110386
75. M.Freeman. MEMS Scanned Laser Head-Up Display. Proc. of SPIE Vol. 7930 (2011)
76. A.Laskin, V.Laskin. Applying refractive beam shapers of circular symmetry to generate shapes of homogenized laser beams. Proc. of SPIE Vol. 7913 (2011)
77. P.S.Sadhu. Mobile communication device with built-in projecting screen. US2010309442
78. H-J.Lee, Y-H.Lee. Projection lens unit for pico-projector. JP2011170309
79. Z.Nizani, M.Aloni. Micro-projector. US2011037953
80. I.Shyshkin, S.K.Yun. Beam homogenizer. KR20100070063
81. I.Shyshkin, S.K.Yun. Projection lens. KR20100070192
82. I.Shyshkin, S.Masaaki. Projection lens capable of adjusting projection distance. KR20100094858
83. I.Shyshkin, S.Masaaki. Illumination optical apparatus. KR20100094863
84. I.Shyshkin, S.Masaaki. Illumination apparatus. KR20100096398
85. P.Destain. Optical projection subsystem. US7901083
86. T.Baba, C.Yamamoto, K.Sado. Small projection lens and projection display device. US20100053774
87. I.Shyshkin. Projection lens for embedded pico projector. SAMSUNG Best Paper Award 2010
88. I.Shyshkin. Illumination optics for embedded pico projector. SAMSUNG Best Paper Award 2010
89. C.Yamamoto. Single projection display device. US20100091247
90. M-K.Lin, T-H.Wu. Projection display device. US20100296062
91. C.Yamamoto. Projection optical system and projection type display apparatus using the same. US20100315598
92. Masaru Amano. Projection lens and projection type display apparatus. US2011051101
93. D.Kim, J.Shanley. Optical system for a digital light projection system. US20110164227
94. M-K.Park, Y-C.Ken. Image projector. US20110188002
95. H-J.Lee, Y-H.Lee. Projection lens unit for pico-projector. US20110199690
96. M-K.Lin, T-H.Wu. High efficiency pico-projector apparatus. TW201128289
97. M-K.Lin, T-H.Wu. Pico-projector apparatus. US2011058146
98. C.Yamamoto. Projection lens and projection type display apparatus using the lens. US2011242682
99. C.Yamamoto Projection lens and projection type display apparatus using the lens. US2011242685

100. T.Yoshitaka. Coupling lens, illumination device and electronic device. US2011249240
101. Y.Toshiyuki. Lens system and display device. US2011249343
102. U.Hofmann, C.Eisermann et al. MEMS scanning laser projection based on high-Q Vacuum packaged 2D-resonators. Proc. of SPIE Vol. 7913 (2011)
103. P.Destain. On-Axis Projection Lens with Offset. US2012008102
104. J.Grahmann, M.Wildenhain et al. Laser Projector Solution Based On Two 1D Resonant Scanning Micro Mirrors Assembled in a Low Vertical Distortion Scan Head. Proc. SPIE Vol. 8252 (2012)
105. L.Kilcher, N.Abelé. MEMS-based micro projection system with a 1.5cc optical engine. Proc. of SPIE Vol. 8252 (2012)
106. J.Bietry, B.Silversein, J.Kruschwitz. Laser illuminated micro-mirror projector. EP2423745 (2012)
107. A.Werner. Laser diode array for use in e.g. pico-projector. DE102011078519
108. S-G.Shile, D.Tsai. Light source system of pico-projector. US2012002174
109. H-J.Lee, J-H.Kim. Projection lens unit for pico-projector. US2012170133
110. M.Freeman. Correcting scanned projector distortion by varying the scan amplitude. US8111336
111. I.Shyshkin. Ultra-thin camera lens. SAMSUNG Best Paper Award 2012
112. I.Shyshkin. Fotografisches objektiv. DE102014103935
113. <http://www.ipms.fraunhofer.de>
114. <http://www.microvision.com>
115. <http://www.ti.com>
116. <http://www.siliconlight.com>
117. <http://www.luminus.com>