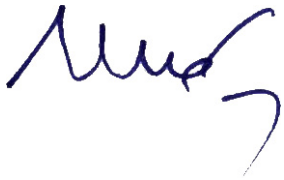
На правах рукописи



Шишкин Игорь Петрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Специальность 05.11.07

«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Москва 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре прикладной оптики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Соломатин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Бажанов Юрий Вадимович**
доктор технических наук, профессор,
АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», зам. начальника отделения 01

Ширанков Александр Фёдорович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. Н. Э. Баумана», начальник отдела

Ведущая организация: ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

Защита диссертации состоится «14» июня 2018 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, МИИГАиК, зал заседаний Учёного совета.

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

Автореферат разослан «11» апреля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Вшивкова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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.

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 принципы построения и методики расчета осветительных системы минипроекторов с применением методов преобразования излучения лазерных диодов.

2. Разработаны оригинальные оптические схемы и методика 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.

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

Перечисленные разработки теоретически обоснованы, защищены 24 патентами, доведены до конкретных инженерных рекомендаций и внедрения в

серийные образцы современной оптической проекционной техники и технологии.

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 с применением методов миниатюризации и методов преобразования излучения лазерных диодов.

3. Разработаны оригинальные оптические схемы объективов 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.

4. Разработаны многофункциональные, комбинированные, монолитные и планарные оптические элементы.

5. Разработаны варианты конструкций оптических модулей минипроекторов.

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

Степень достоверности и апробация результатов

Были подтверждены при создании прототипа минипроектора 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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.

В современных мультимедийных проекторах используется как диаскопические, так и эпископические проекторы, построенные на основе просветных жидкокристалических LCD матриц, проекторы на основе отражающих микрозеркальных DLP (DMD) и отражающих

жидкокристалических LCoS микродисплеев и проекторы со сканированием лазерного луча.

В диссертации рассматривались преимущественно отражающие минипроекторы и проекторы со сканированием лазерного луча, как наиболее перспективные с точки зрения применения в мобильных устройствах.

Минипроекторы можно классифицировать по сегментам рынка (потребительским параметрам) следующим образом:

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

Такая классификация позволяет оценить рыночную конъюнктуру (сегменты рынка, цена) и определить наиболее востребованные конфигурации таких систем.

Аналитические данные показывают, что сегодня одним из ключевых направлений для использования микродисплеев с высоким разрешением (свыше 800×600 пикселей) стали минипроекторы, встроенные в мобильные телефоны и смартфоны, в цифровые камеры и видеокамеры - так называемые пикопроекторы.

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

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.

Одно из основных преимуществ DMD-матриц перед LCD состоит в их большей световой эффективности. Это обусловлено, во-первых, тем, что формирующие изображение элементы (микрозеркала) поглощают меньше света, а во-вторых, более эффективным использованием площади кристалла. Как следствие, существенно улучшается качество проецируемой на экран картинки, более четкими оказываются границы окрашенных в разные цвета участков изображения. Важно также, что для DLP решена проблема инерционности, присущая LCD-технологии.

В DLP-проекторах легче решается задача теплоотвода: неиспользуемая часть светового потока направляется на специальный поглотитель, преобразующий свет в тепло. При этом упрощается конструкция проектора по сравнению с аппаратами на просветных LCD-матрицах, в которых тепло приходится отводить непосредственно от самой матрицы.

Благодаря непрерывному совершенствованию DLP-технологии, наряду с уменьшением размеров матрицы удалось вдвое уменьшить геометрические размеры электронной части проектора и примерно вдвое увеличить яркость и контрастность изображения современных DLP-проекторов.

Аналитический обзор современных проекционных технологий и принципов построения проекционных систем показал, что наиболее перспективными и ключевыми направлениями развития минипроекторов являются совершенствование осветительных систем на основе лазерных

диодов 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).

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

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

На рис.1 представлена схема преобразования излучения в осветительной системе лазерного проектора.

Схема отражает последовательность преобразования световых пучков при прохождении света от источника излучения (лазерного диода) до плоскости освещения (дисплея). Как можно видеть из схемы, процесс преобразования излучения в осветительной системе минипроектора предполагает наличие достаточно длинной цепочки различных функциональных элементов.

РИС. 1 СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Автором впервые была предложена компактная оптическая система, позволяющая компенсировать изменение угла расходимости лазера в минипроекторе.

Эта система представлена на рис.2 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.

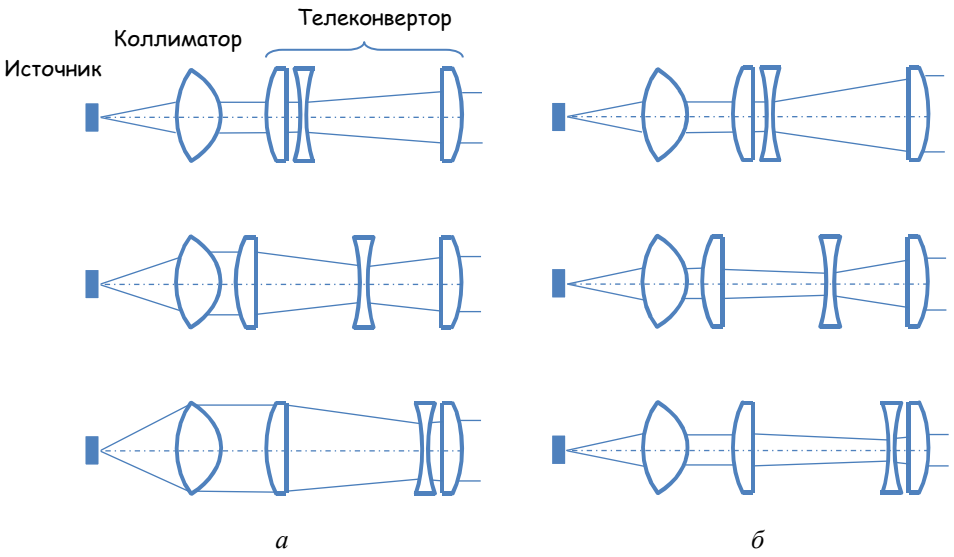


РИС. 2 ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
КОМПЕНСАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРА
а – при фиксированном выходном диаметре пучка; *б* – при фиксированном угле расходимости лазера

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

При разработке осветительных систем минипроекторов автором сформулированы методы миниатюризации:

– *разработка компактных оптических схем с рациональным применением асферических, дифракционных элементов для эффективной коррекции аберраций;*

– *разработка комбинированных оптических узлов и 3х-мерное проектирование;*

– *разработка многофункциональных элементов для преобразования оптического излучения;*

– *разработка монолитных и планарных оптических элементов.*

Предлагаемые решения были защищены патентами [15,17,23,30,33,35-37,40,41].

В третьей главе дана классификация проекционных объективов, проведены теоретические исследования двухкомпонентного проекционного объектива с воздушным промежутком, получено характеристическое уравнение, определяющее область оптимальных значений кардинальных отрезков в объективе.

На основе аберрационного анализа двухкомпонентного проекционного объектива было показано, что в объективе с оптимальным сочетанием величин кардинальных отрезков может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических аберраций 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 аберраций третьего порядка в триплете было показано, что при таком сочетании оптических сил в объективе может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических аберраций 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.

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

Выражения, определяющие коэффициенты аберраций третьего порядка оптической системы, состоящей из двух тонких компонентов можно представить в следующем виде:

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

где S_I, S_{II} и S_{III} – суммы Зейделя, определяющие сферическую аберрацию, кому и астигматизм, P, W – аберрационные параметры линз, h, y – параметры вспомогательных лучей, Ф – оптическая сила компонента.

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

Для решения задачи выразим параметры P и W через основные параметры **P** и **W**:

$$P_i = (\alpha_i' - \alpha_i)^3 \mathrm{P_i} + 4\alpha_i (\alpha_i' - \alpha_i)^2 \mathrm{W_i} + \alpha_i (\alpha_i' - \alpha_i)[2\alpha_i (2+\pi) - \alpha_i']$$
$$W_i = (\alpha_i' - \alpha_i)^2 \mathrm{W_i} + \alpha_i (\alpha_i' - \alpha_i)(2+\pi)$$

где α, α' – параметры вспомогательных лучей.

После последовательности преобразований были получены следующие выражения для сумм Зейделя:

$$S_I = 0{,}3\mathrm{P_1} + 0{,}04\mathrm{P_2} + 0{,}1\mathrm{W_2} + 0{,}19 ;$$
$$S_{II} = -0{,}11\mathrm{P_2} + 0{,}44\mathrm{W_1} - 0{,}19\mathrm{W_2} + 0{,}02 ;$$
$$S_{III} = 0{,}33\mathrm{P_2} + 0{,}24\mathrm{W_2} - 0{,}19.$$

В полученных выражениях достаточно положить $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_2 = \mathbf{W}_1 = \mathbf{W}_2 = 0$, а поскольку свободные члены выражений имеют малые величины, то можно сделать вывод, *что* в двухкомпонентном объективе с оптимальным сочетанием величин кардинальных отрезков *может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических аберраций 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.

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.

Задача по расчёту триплета при условии исправления пяти монохроматических аберраций третьего порядка состоит в решении уравнений с пятью неизвестными: Φ_1, Φ_2, Φ_3, d_1 и d_2.

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 аберраций третьего порядка *было показано, что* в объективе с таким сочетанием оптических сил *может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических аберраций 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).

Найденные решения объективов описаны в работах [1,2,9] и *защищены патентами* [24,31,32].

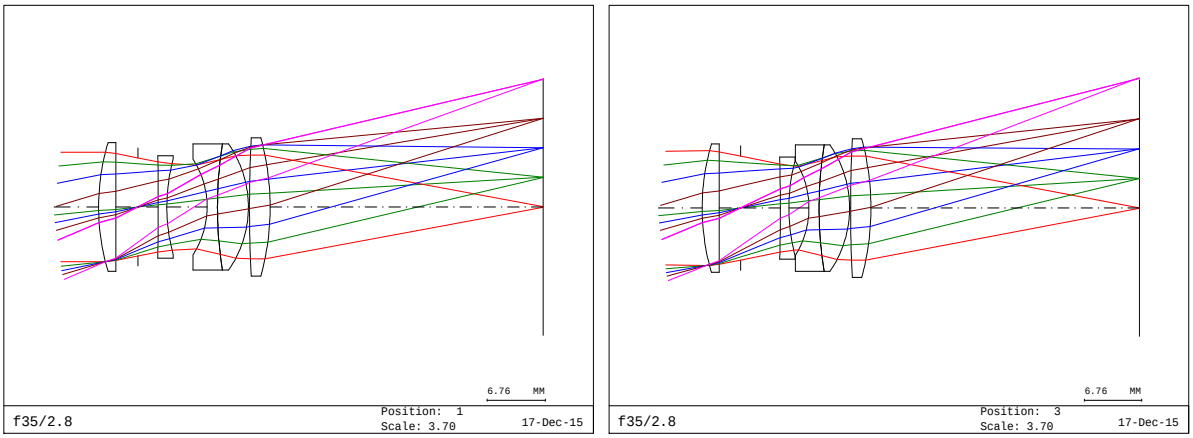


РИС. 3 ОБЪЕКТИВ С ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

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

В табл.1 приведены основные характеристики объективов современных минипроекторов.

Таблица 1

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

Как видно из табл.1, диапазон характеристик объективов достаточно широкий и определяется типом минипроектора.

Исходя из известных параметров заданного микродисплея – формата, разрешения (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.

На рис.4 обозначены основные параметры для расчёта объектива.

В табл.2 приводится типичная спецификация минипроектора.

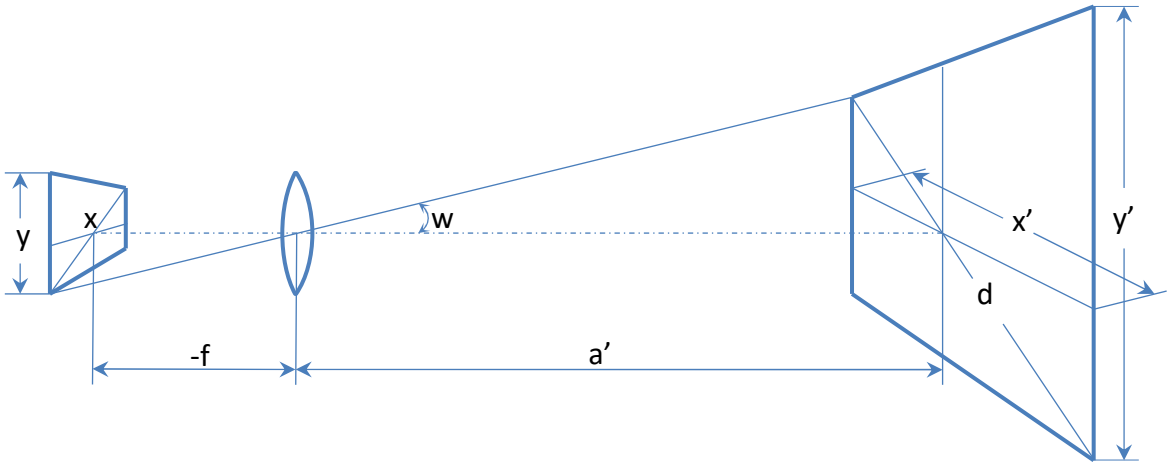


РИС. 4 РАСЧЁТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТИВА

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

Таблица 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%

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.

Размер пикселя (5÷7 мкм) в оптическом модуляторе, как и размеры оптического модуля (<10 $см^3$) минипроектора, продолжают неуклонно уменьшаться. И в этой связи становится всё труднее выдерживать требования, предъявляемые к относительному отверстию, угловому полю и разрешающей способности объектива и поэтому создание компактного объектива с высоким

разрешением для встроенных минипроекторов является достаточно актуальной задачей.

Направлениями решения этой задачи в настоящей работе стали:

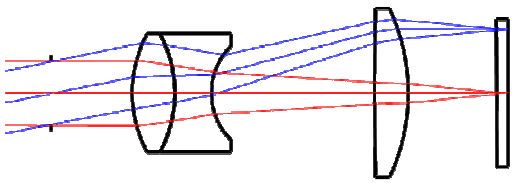
– *определение оптимальной схемы объектива с учётом описанных выше требований*;

– *рациональное применение асферических, дифракционных элементов для коррекции аберраций*,

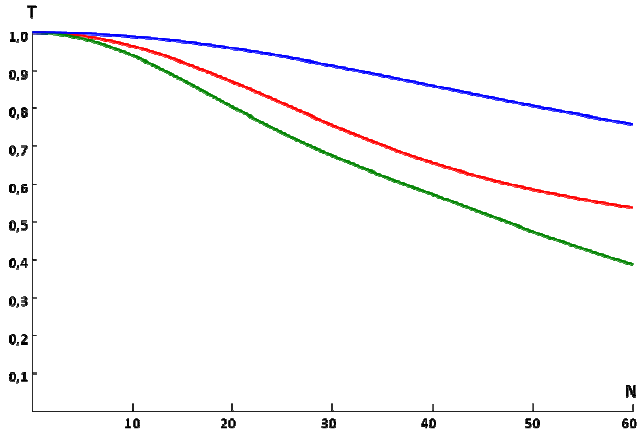
что, с одной стороны, позволило упростить конструкцию объектива (в части минимизации числа линз), а с другой стороны – обеспечить его высокие оптические характеристики.

На рис.5*а* показан вид компактного объектива после окончательной оптимизации. Несмотря на достаточно простое решение, эта конструкция удовлетворяет всем необходимым требованиям: вынос входного зрачка, большой задний отрезок, телецентричность.

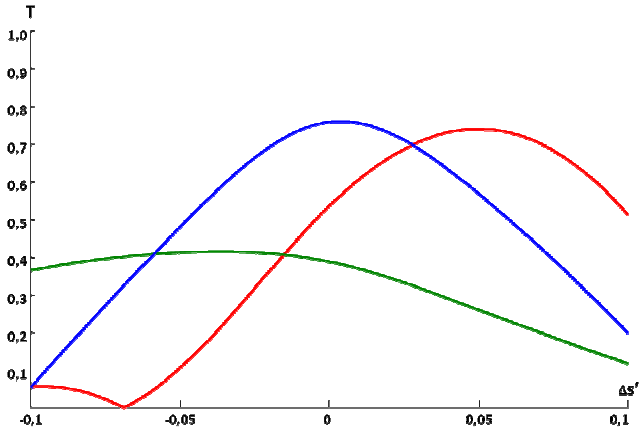
На рис.5*б* представлен график оптической передаточной функции, на рис.5*в* – график дефокусировки. Из графиков следует, что разрешение объектива составляет 60 лин/мм при контрасте 0,5, что соответствует разрешению пикселей с размером 10÷15мкм.



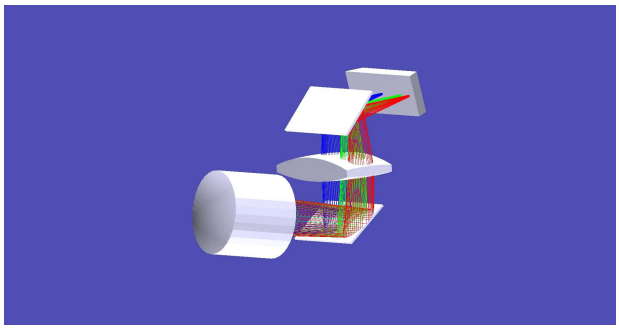
а



б



в



г

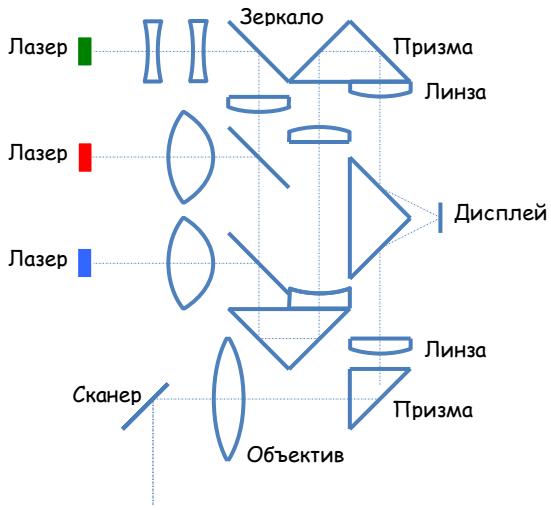
РИС. 5 ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ОБЪЕКТИВ

а – схема объектива; *б* – график оптической передаточной функции; *в* – график дефокусировки; *г* – 3*D*-модель на графиках: T – 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.

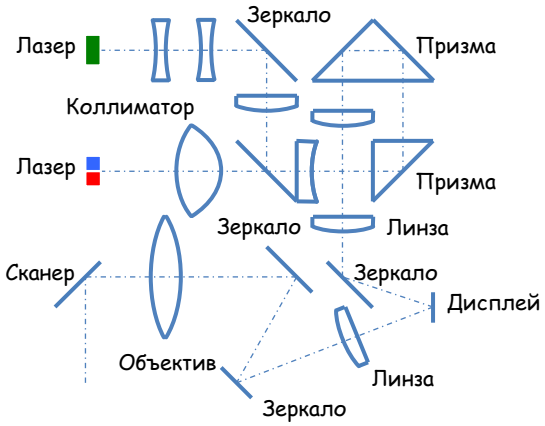
Современные программные комплексы расчёта оптических систем, такие как Zemax, Code V, предоставляют широкие возможности для моделирования оптических систем, их оптимизации, анализа качества изображения и расчёта допусков. В диссертации содержатся соответствующие примеры расчёта объективов, разработанные автором.

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

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.



а



б

РИС. 6 ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОГО МИНИПРОЕКТОРА
а – конфигурация I; *б* – конфигурация II

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.6 иллюстрирует оптические схемы лазерного минипроектора, предложенные автором.

Для достижения минимальных размеров модуля необходимо 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).

Конфигурации, показанные на рис.6, отличаются расположением оптического модулятора, количеством призм и зеркал, углами наклона оптической оси. Размер модуля составил ~ 30×30 мм.

На рис.7 изображена схема планарного минипроектора, предложенная автором [25,29].

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.

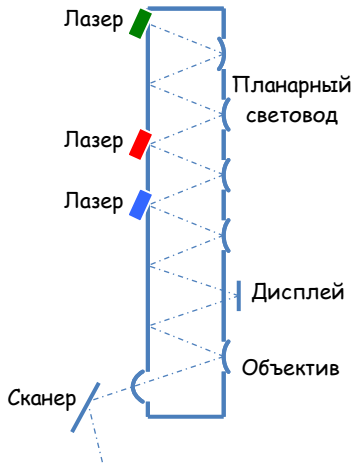


РИС. 7 СХЕМА ПЛАНАРНОГО МИНИПРОЕКТОРА

В заключении подведены основные **итоги** проведённого исследования:

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.

На основе анализа современных проекционных технологий были 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.).

Аналитический обзор современных проекционных технологий и принципов построения проекционных систем показал, что **перспективными** и ключевыми направлениями развития минипроекторов являются совершенствование осветительных систем с целью повышения яркости изображения, уменьшение габаритных размеров объективов минипроекторов, а также разработки компактных оптических модулей минипроекторов, расширяющих их функциональные возможности (внутренняя фокусировка, переменное увеличение).

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в изданиях из перечня ВАК

1. Шишкин И.П. Компактные объективы миниатюрных проекторов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – №3. – с.115-119
2. Шишкин И.П. Триплет с внутренней фокусировкой // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – №4. – с.134-139

Статьи в базе данных Scopus

3. 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)
4. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Spatial optical modulator (SOM): high density diffractive laser projection display. Proc. of SPIE. Vol.6487 (2007)
5. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Design and Image Processing of Novel Diffractive Optical Modulator for Embedded Module Display Applications. Optics InfoBase Conference Papers (2007)
6. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile applications. Proc. of SPIE.Vol.6887 (2008)

Прочие статьи, доклады на конференциях

7. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. Samsung Optical Modulator (SOM) as the Light Modulator for Next Generation Display Applications. SAMSUNG Tech Conference 2006
8. S.K.Yun, I.Shyshkin et al. SOM-based projection module for mobile displays. Journal of the Society for Information Display. June 2010
9. I.Shyshkin. Projection lens for embedded pico projector. SAMSUNG Tech Conference 2010
10. I.Shyshkin. Illumination optics for embedded pico projector. SAMSUNG Tech Conference 2010

Патенты

11. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Display device using single panel light modulator. JP2007272233

12. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Display device using single panel light modulator. US2007229924
13. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Beam shaper. KR20080058001
14. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Displaying apparatus for correcting image distortion. KR100808100
15. I.Shyshkin, K.Y.Oh. A beam conversion apparatus. KR20080098255
16. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Display device using diffractive light modulator and having image distortion function. US2008036974
17. S.Masaaki, Y.Chung Mo, I.Shyshkin. Light axis adjusting apparatus and projection display apparatus using light axis adjusting apparatus thereof. KR20080072399
18. I.Shyshkin. Monolithic collimator. KR20080098971
19. H.S.Yang, I.Shyshkin. Line beam generator. KR100863196
20. I.Shyshkin. Projection apparatus. KR100872571
21. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Monolithic lighting device. US2008205470
22. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Miniature color display apparatus. US2008212037
23. I.Shyshkin, C.G. Kim, K.Y.Oh. Illumination optical apparatus. US2008266862
24. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Projection lens. US2008285160
25. I.Shyshkin. Light projection apparatus and display apparatus using it. KR20090014900
26. I.Shyshkin, Light guide plate and display apparatus using it. KR20090014916
27. I.Shyshkin. Catadioptric monolithic line beam generator. KR20090014919
28. I.Shyshkin, K.Y.Oh. Monolithic beam expander. KR20090015478
29. I.Shyshkin. Lighting guide plate. KR20090015735
30. I.Shyshkin. Laser module having aspheric collimate lens. KR20090029565
31. I.Shyshkin. Hybrid apochromatic lens. KR20090080445
32. I.Shyshkin. Projection lens. KR20090130964
33. I.Shyshkin, S.Masaaki. Zoom expander. KR20100048092
34. I.Shyshkin. Wide angle projection lens. KR20100048123

35. I.Shyshkin. Illumination apparatus. KR20100048125
36. I.Shyshkin, S.K.Yun. Relay lens and display device including the same. KR20100060977
37. I.Shyshkin, S.K.Yun. Beam homogenizer. KR20100070063
38. I.Shyshkin, S.K.Yun. Projection lens. KR20100070192
39. I.Shyshkin, S.Masaaki. Projection lens capable of adjusting projection distance. KR20100094858
40. I.Shyshkin, S.Masaaki. Illumination optical apparatus. KR20100094863
41. I.Shyshkin, S.Masaaki. Illumination apparatus. KR20100096398