

Проблемы и тенденции в проектировании светосильного репродукционного объектива для микропроекции

© Т.С. Ровенская

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 1005005, Россия

Линзовый объектив видеоустройства для микрорепродукции относится к актуальному сектору современных фотографических объективов. Принимая во внимание назначение объектива, в нем необходимо обеспечить сложное для реализации сочетание высоких значений относительного отверстия, углового поля и показателей качества изображения при таких конструктивных особенностях схемы, как компактность, телереверсивность, телецентричность (квазителецентричность) хода главных лучей в пространстве изображений. С учетом обсуждаемых технических характеристик определены классификационные признаки для выбора источников информации и групп объективов-аналогов, на основании исследования которых сформулированы концепции структурных схем для данного класса объективов. Выполнен анализ уровня и совокупности технических характеристик, структурных закономерностей и актуальных коррекционных элементов аналогов — проекционных объективов видеопроекторов. Рассмотрен комплекс проблем, связанных с выбором оптических материалов высокой прозрачности для рабочего спектрального диапазона и показаны перспективы их разрешения.

Ключевые слова: *фотографический объектив, проекционный объектив, реверсивный телеобъектив, структурная схема, абберационный анализ.*

Введение. Актуальные для современного состояния оптико-электронного приборостроения задачи связаны с созданием различных видеосистем нового поколения. При этом требования к их габаритным, оптическим и качественным характеристикам усложняются, а рабочий спектральный диапазон расширяется в ближние УФ- и ИК-области. В значительной степени эти тенденции развития видеосистем обусловлены совершенствованием матричных цветных приемников излучения (прежде всего повышением их разрешения) и применением новых методов и технологий получения и обработки оптического изображения. Совершенствование цифровых устройств записи, передачи и отображения информации обусловило разработку соответствующих им фотографических объективов с постоянными (монофокальные объективы) и переменными (панкратические объективы) значениями оптических характеристик. В зависимости от назначения устройств соответствующие им оптические системы от-

носятся к телевизионным, репродукционным или проекционным объективам. Некоторые закономерности построения оптических схем указанных объективов были выявлены в результате анализа патентных описаний линзовых монофокальных проекционных объективов для видеопроекторов разработок ведущих фирм — производителей Японии, Тайваня, Южной Кореи, США.

Современные репродукционные оптико-электронные устройства находят все возрастающее применение в различных областях деятельности человека, включая оборону, правоохранительную деятельность и борьбу с терроризмом, промышленное и сельскохозяйственное производство, связь и управление, бизнес, науку, образование, медицину, искусство, индустрии рекламы и развлечений. Объектив репродукционной системы является ключевым элементом, влияющим на качество формируемого ею информативного видеоизображения. Уровень современных габаритных, оптических и качественных характеристик репродукционных объективов определенного класса отражают приведенные ниже данные репродукционного объектива перспективного оптико-электронного устройства, предназначенного для работы в спектральном диапазоне 0,34...0,90 мкм.

Исследование характеристик проектируемого репродукционного объектива и проекционных объективов для видеопроекторов, рассматриваемых в качестве объективов-аналогов, позволяет проанализировать тенденции, характерные для современного этапа развития репродукционных объективов цифровых оптико-электронных устройств, и сформулировать некоторые актуальные проблемы их проектирования.

Анализ характеристик и структурных особенностей репродукционного объектива. Уровень современных габаритных, оптических и качественных характеристик репродукционных объективов определенного класса отражают приведенные ниже данные репродукционного объектива перспективного оптико-электронного устройства, предназначенного для работы в спектральном диапазоне 0,34...0,90 мкм. Объектив должен обеспечивать следующие характеристики:

Передняя апертура $2\sin \sigma_d$	Не менее 0,015
Линейное поле в пространстве предметов $2u$, мм	400
Дистанция съемки (расстояние от плоскости предмета до плоскости изображения L), мм	500,0
Дисторсия в пределах поля изображения, %	Не более 0,5
Размер изображения $2u'$, мм	12,5
Коэффициент светопропускания в рабочем спектральном диапазоне, %	75
Задний отрезок (задний фокальный отрезок), мм	Не менее 13,0

Относительная освещенность на краю поля в плоскости изображения, %	80
Расчетная разрешающая способность N_0 по уровню ФПМ = 0,3, линий/мм:	
центр кадра	150
край кадра	100

В дополнение к этим показателям определены значения следующих оптических и габаритных характеристик проектируемого репродукционного объектива:

1) паракиальное линейное увеличение β объектива (масштаб съемки):

$$\beta = y'/y = -0,031;$$

2) заднее фокусное расстояние f' объектива (рассчитано по заданному значению дистанции съемки L и найденному выше линейному увеличению β при условии тонкого объектива [1]), мм:

$$f' = L/[1 - \beta - (1/\beta)] = 14,69;$$

3) относительное отверстие D/f' , при этом полагаем, что совпадают плоскости тонкого объектива и входного зрачка, и пренебрегаем малым значением отрезка от заднего фокуса объектива до плоскости паракиального изображения (справедливо при малой величине модуля линейного увеличения):

$$D/f' = 1:2$$

при диаметре входного зрачка, мм,

$$D = 2(L - f') \operatorname{tg} \sigma_A = 7,28;$$

4) угловое поле в пространстве предметов, град,

$$2\omega = \operatorname{arctg} [y/(L - f')] = 44,8;$$

5) нормированное значение заднего фокального отрезка $S'_{f'}$:

$$S'_{f'}/f' = 0,88.$$

Малое значение модуля линейного увеличения объектива позволяет на этапе классификационного анализа отнести проектируемый объектив к фотографическим объективам, строящим изображение квазибесконечно удаленного объекта. В этом случае в соответствии с [2] анализируемый репродукционный объектив можно классифицировать:

- по значению фокусного расстояния — как объектив среднего значения фокусного расстояния или как короткофокусный;
- по относительному отверстию — как светосильный;

- по значению углового поля в пространстве предметов — как объектив с нормальным угловым полем со смещением к позиции широкоугольных объективов;

- по соотношению значения заднего фокального отрезка и фокусного расстояния — его можно считать близким к реверсивным телеобъективам.

Качество формируемого оптического изображения оценивается по нескольким составляющим. Одна из них связана с расчетными полихроматическими частотно-контрастными характеристиками объектива (или функциями передачи модуляции — ФПМ) для выделенных точек поля изображения. Качество объектива оценивают или по значениям ФПМ на определенных (критериальных) значениях пространственных частот, или по значениям частот, соответствующих заданному уровню ФПМ. В результате определяют ожидаемое разрешение для соответствующих точек поля на заданных уровнях контраста. По данному показателю проектируемый объектив должен быть отнесен к объективам высокого разрешения [1–3]. Действительно, диаметр кружка Эйри δ при знаменателе относительного отверстия $K = 2$ в соответствии с выражением

$$\delta = 1,22K\lambda$$

составляет $\delta_{\lambda_1} = 0,83$ мкм для $\lambda_1 = 0,34$ мкм и $\delta_{\lambda_2} = 2,2$ мкм для $\lambda_2 = 0,9$ мкм. Если принять, что указанная выше для центра кадра критериальная пространственная частота N_0 равна или близка частоте Найквиста N_H , в частности при

$$N_0 = (0,8 \dots 0,9)N_H \approx 0,85N_H,$$

то с учетом $N_H = (1/2)\delta_p$ для размера пиксела δ_p матричного приемника справедливо выражение

$$\delta_p = 0,425/N_0.$$

Тогда при $N_0 = 150 \text{ мм}^{-1}$ размер пиксела δ_p составит 2,83 мкм. Отсюда, принимая во внимание определенное выше значение диаметра кружка Эйри $\delta_{\lambda_2} = 2,2$ мкм, следует, что при работе объектива в спектральном диапазоне значений 0,34...0,90 мкм на его длинноволновой границе требуется исправление объектива на уровне, близком к дифракционному ограничению.

Достижение рассчитанных значений разрешения обеспечивается при абберационном исправлении объектива, который по коррекции монохроматических aberrаций в пределах поля должен относиться к объективам-плананастигматам.

В технические требования включено также условие коррекции геометрической дисторсии с высоким уровнем ее исправления: ли-

нейная дисторсия ограничена значением порядка 0,032 мм. В то же время известно, что такое свойство объектива, как телереверсивность, обеспечивают благодаря применению определенных структурных схем, которые отличаются трудностями при коррекции дисторсии [1–3]. Таким образом, одновременное удовлетворение требований высокого уровня исправления дисторсии и обеспечения достаточного выноса плоскости изображения (телереверсивности схемы) может рассматриваться как фактор, осложняющий задачу проектирования обозначенной группы объективов.

В результате расширения спектрального диапазона возможна также постановка задач по установлению необходимой и достаточной степени исправления хроматических аберраций, а именно: ахроматической или даже апохроматической, и далее в зависимости от сделанного вывода — по выбору соответствующих методов и средств решения задачи. Указанный выше рабочий спектральный диапазон не тривиален: в современных фотографических (репродукционных, телевизионных и проекционных) объективах цветного изображения для анализа в предельном случае используют 587,6 нм (линия *d*); 435,8 нм (линия *g*); 656,3 нм (линия *C*) в качестве характеристических длин волн.

Другая составляющая качества изображения связана с требованием к изменению функции освещенности изображения по полю. В рассматриваемом варианте освещенность по полю изображения может быть охарактеризована как стабильно высокая. Известно, что освещенность в точке поля определяется геометрическим и аберрационным виньетированием и зависит от величины угла главного луча внеосевого пучка в пространстве изображений с оптической осью. В контексте анализируемой проблемы следует решать вопрос выбора схемы построения объектива из двух принципиально различных типов схем. Эти схемы различаются между собой ходом главных лучей внеосевых пучков в пространстве изображений: 1) с телецентрическим ходом главного луча внеосевого пучка; 2) с переменным по полю и существенно отличным от нуля значением этого угла. Применительно к данному случаю следует подчеркнуть, что схемы первого типа имеют преимущество при использовании их с матричными приемниками и для удовлетворения требований к выравниванию освещенности по полю изображения.

Еще одна составляющая качества проектируемого объектива связана с обеспечением высокого значения коэффициента светопропускания в рабочем спектральном диапазоне, для чего требуется достичь низкого уровня потерь за счет поглощения и отражения. На стадии проектирования объектива этот показатель зависит от спектральных показателей ослабления оптических материалов линз, толщины оп-

тических сред, числа граничащих с воздухом оптических преломляющих поверхностей и спектральных характеристик просветляющих покрытий.

Таким образом, выполненный анализ характеристик репродукционного объектива показывает, что они образуют нетривиальный комплекс габаритных, оптических, спектральных и качественных характеристик. При сочетании высоких значений относительного отверстия и углового поля в пространстве предметов и работе его в широком спектральном диапазоне объектив должен удовлетворять возросшим требованиям к рассмотренным выше разнообразным показателям качества изображения (разрешению в нетривиальном спектральном диапазоне, уровню исправления дисторсии, к стабильности освещенности по полю при высокой прозрачности).

Одновременно с этим необходимо обеспечить конструктивные особенности схемы — телереверсивность, телецентричность или квазителецентричность хода главных лучей в пространстве изображений, а также решить остро актуальную задачу компактности объектива. Это выводит проектирование таких оптических систем на уровень прикладных научных разработок. Следует провести исследования по оптимизации расчетных моделей на всех этапах разработки, включая выбор групп используемых оптических материалов, структурный и параметрический синтез компонентов с необходимым и достаточным числом силовых и коррекционных элементов.

Обоснование выбора классификационных групп объективов-аналогов. Для обоснования концепции строения структурной схемы репродукционного объектива выполнен анализ схем и характеристик объективов-аналогов, определенных по различным источникам информации. Исследованы обзоры фотографических, киносъемочных, кинопроекторных и репродукционных объективов, которые были разработаны в предшествующие годы в СССР и за рубежом [1–4]; патенты США на светосильные, в том числе широкоугольные, фотографические и проекционные объективы для цифровой обработки информации (за период с 2005 г. по настоящее время) [5]; объективы, полученные в результате структурного синтеза с помощью эвристических правил [6–8]; обзор оптических схем современных объективов микроскопов и результаты их анализа с позиции решения абберационных задач [9]; базы объективов программы ZEMAX [10].

Обращение к исследованиям в области абберационного расчета объективов микроскопов является весьма полезным по нескольким причинам. Во-первых, объективы микроскопов с большим значением увеличения или рассчитанные на тубус «бесконечность» с увеличенным рабочим расстоянием имеют ряд особенностей в структурных

схемах, родственных репродукционным объективам рассматриваемого класса. Так, в схемах объективов микроскопов находится апертурный фронтальный положительный блок и устанавливаемая за ним оптическая часть, которые в совокупности обеспечивают телереверсивное или близкое к нему (квзителереверсивное) соотношение переднего отрезка S и фокусного расстояния f' объектива микроскопа, аналогичное соотношениям заднего отрезка S' и фокусного расстояния f' в реверсивных телеобъективах.

Во-вторых, как современные объективы для видеомикроскопии, так и проекционные объективы по степени коррекции монохроматических аберраций относятся к плананастигматам, а микрообъективы для «малой» фотолитографии должны быть также исправлены и в отношении дисторсии.

В-третьих, для микрообъективов традиционно решают задачи получения высококачественного изображения мелких структур в широкой области спектра — от ближнего УФ- до ближнего ИК-диапазонов (0,24...0,800 мкм) [9].

Обоснованно также обращение к базам проекционных объективов. Для сектора современных проекционных устройств востребована линейка высококачественных светосильных широкоугольных проекционных объективов с большими значениями линейного увеличения на экране. С помощью таких объективов реализуются жидкокристаллическая (liquid crystal display — LCD, liquid crystal on silicon — LCoS) или микрозеркальная (digital light processing — DLP) проекционные технологии [11]. В объективах указанного назначения должен быть выполнен комплекс технических требований: 1) получено определенное значение заднего отрезка, которое в короткофокусном объективе приводит к условию телереверсивности его схемы; 2) выдержан регламентированный, близкий к телецентрическому, ход главных лучей внеосевых пучков в пространстве изображений (для обратного хода лучей в объективе); 3) обеспечен цифровой стандарт разрешения и формата кадра (определяется модулятором). Перечисленный набор требований аналогичен указанному для репродукционного объектива.

В результате анализа решений-аналогов определены закономерности построения структурных схем репродукционных объективов и выделены современные тенденции их конструктивного и технологического исполнения.

Концепции построения структурных схем репродукционного объектива. Концептуальный характер имеют выводы, сделанные в отношении структурных особенностей оптических схем светосильных и широкоугольных киносъёмочных объективов [1, 2]. Они в полной мере могут быть спроецированы на современный этап разви-

тия светосильных объективов со средними и широкими полями для фотографических, проекционных и репродукционных устройств с цифровой обработкой изображения. Эти выводы, в частности, сформулированы при анализе оптических схем асферического объектива «Ликар-6» и сферического объектива «Ликар-7», разработанных в СССР для киносъемки на 8-мм пленку и на пленку форматом «Супер-8» [1, 2]. По характеристикам эти объективы являются короткофокусными, светосильными, особо широкоугольными с увеличенным значением заднего фокального отрезка и отличаются повышенной равномерностью распределения освещенности по полю изображения. Схема «...проектируется установкой впереди основного компонента объектива сложного отрицательного компонента или афокальной насадки с телескопическим увеличением в 2–3 раза меньшим единицы» [2], при этом необходимо обеспечить малые значения углов с оптической осью главных лучей внеосевых пучков для сохранения постоянства освещенности по полю изображения. В результате соблюдения условия телецентричности хода главных лучей в пространстве изображений достигают увеличения продольного габарита объектива и ухудшения условий для коррекции аберраций высших порядков.

В [12] также сформулированы некоторые принципы построения структурной схемы широкоугольных светосильных объективов, близких к объективам анализируемого класса; их суть сводится к следующему. В объективах с развитым полем в пространстве предметов и с скорректированной дисторсией задача выравнивания освещенности изображения по полю принципиально решается на основе светосильного объектива симметричной конструкции, модернизированного «...путем создания первого отрицательного компонента, развешивающего поле и обладающего исправленной дисторсией». Подавляющее число схем современных фотографических широкоугольных и светосильных объективов, представленных в патентах, имеют схемы, соответствуют сформулированным в цитируемой работе [12] принципиальным особенностям: 1) схемы «...обладают передним отрицательным компонентом, к которому предъявляются требования по исправлению дисторсии; 2) выходной зрачок первого компонента ... расположен за ним для того, чтобы была возможность совместить зрачок входа второго компонента со зрачком выхода первого компонента; 3) первый компонент должен обеспечивать существенное уменьшение поля зрения у диафрагмы, необходимое для облегчения работы второго компонента; 4) первый компонент по возможности должен быть исправлен на астигматизм; 5) второй компонент — положительный — должен компенсировать кривизну поля первого компонента, обладать большим относительным отверстием,

а также обеспечивать хорошее исправление комы, астигматизма и сферической аберрации как на оси, так и по полю зрения». Построение схемы из двух расположенных на конечном расстоянии друг от друга компонентов (групп) с первым компонентом отрицательной оптической силы, вторым — положительной оптической силы обеспечивает условия телереверсивности системы.

Технические характеристики, структурные закономерности и актуальные коррекционные элементы проекционных объективов видеопроекторов — аналогов репродукционного объектива. Определенные закономерности построения оптических схем современных линзовых фотографических и проекционных объективов и тенденции их модернизации выявлены в результате анализа патентных документов фирм — производителей репродукционных и проекционных объективов Японии, Тайваня, Южной Кореи, США.

Объективы обеспечивают низкие значения линейного увеличения (при анализе проекционных объективов в обратном ходе лучей) с широким спектром числовых значений основных оптических и габаритных характеристик. Фокусные расстояния f' объективов находятся в диапазоне значений от нескольких единиц до нескольких десятков миллиметров; относительные отверстия ($1:K$) определены от невысоких значений (порядка 1:4) до особо высоких (например, 1:1,45). По значению углового поля в пространстве предметов 2ω объективы относятся как к особо широкоугольным (например, с полем 115°), так и к объективам с полями средней величины (например, с полем 44°). Относительный (в долях фокусного расстояния) продольный габаритный размер объективов (общая осевая длина объектива L , измеряемая от вершины первой оптической поверхности объектива до плоскости изображения) определяется в широком диапазоне значений (20,0...1,3). В большой группе анализируемых технических решений значения заднего отрезка S' оцениваются как увеличенные по сравнению с их значениями в нормальных объективах; при оценке отрезка в относительных единицах его размер находится в диапазоне от близкого к единице до увеличенного в кратное число раз. Этот показатель позволяет классифицировать объективы данной группы как реверсивные телеобъективы.

В анализируемых патентных решениях определяют объективы обоих указанных выше типов, различающиеся между собой ходом главных лучей внеосевых пучков в пространстве изображений. Схему строят из двух расположенных на конечном расстоянии друг от друга групп (компонентов) с первой группой отрицательной оптической силы, второй — положительной оптической силы с внутренним расположением апертурной диафрагмы (АД) (рис. 1, 2).

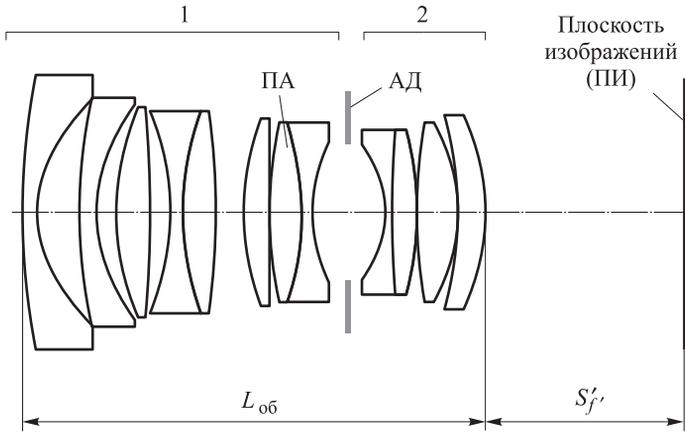


Рис. 1. Схема объектива по патенту США 7,944,625 [15]:

1, 2 — первая и вторая группы элементов по концепции [1, 2]; АД — апертурная диафрагма объектива; ПА — линза с особыми дисперсионными свойствами; $L_{об}$ — длина схемы объектива; $S'_{f'}$ — задний фокальный отрезок объектива

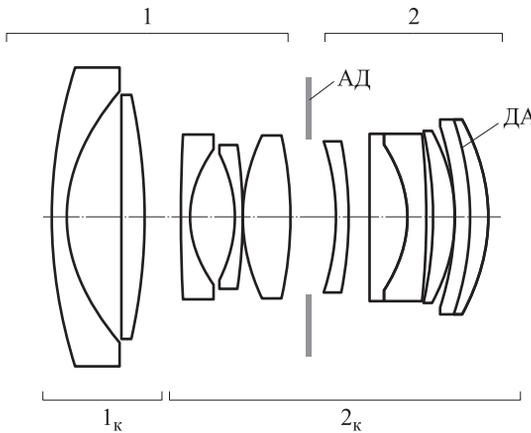


Рис. 2. Схема объектива по патенту США 7,738,182 [16]:

1_к, 2_к — группы 1 и 2 структурной схемы по концепции строения с основным апертурным компонентом с внутренней диафрагмой (вариант а); 1, 2 — группы 1 и 2 возможной структурной схемы (вариант б); АД — апертурная диафрагма объектива; ДА — дифракционная асферика в дифракционном элементе

Наряду с рассмотренной двухгрупповой структурной схемой ряд авторов описывает схему проекционного объектива, состоящую из трех групп (компонентов), которые расположены в последовательности отрицательный, положительный и положительный; апертурная диафрагма размещается между положительными компонентами (рис. 3). Такое строение схемы создает благоприятные предпосылки для достижения телецентрического или близкого к нему хода главного луча в пространстве изображений и для исправления aberrаций в апертурной силовой группе [13]; при этом отрицательный компонент и первый положительный компонент можно рассматривать в качестве эквивалент-

ной первой группы в двухгрупповой структурной схеме. Оптическая сила эквивалентной группы может принимать как отрицательные, так и положительные значения.

Схемы объективов для диапазона спектра 430...660 нм содержат достаточно большое число (от 7 до 15) одиночных и склеенных линз (из двух или трех одиночных) из оптических пластмасс и оптического стекла, включая марки с экстремально высокими значениями показателя преломления и коэффициента дисперсии. Отмечается тенденция применения в схемных решениях современной элементной базы в виде асферических линз (АЛ) с асферическими поверхностями (АП) высших порядков, линз с дифракционными поверхностями (ДЛ) и гибридных линз. Наиболее часто АП применяют в менисковых отрицательных линзах (линзе) фронтальной части первой группы широкоугольных объективов для исправления дисторсии и aberrаций широких наклонных пучков; выявляются решения с асферическими отрицательными менисками, в которых обе поверхности являются АП высшего порядка. Применяют АП также с целью коррекции aberrаций широкого осевого пучка в объективах с высокими значениями относительного отверстия. В этом случае их размещают на положительных линзах вблизи АД или зрачка, а для коррекции сферической aberrации в широких внеосевых пучках располагают АЛ за АД. В целях обеспечения технологической осуществимости АП высоких порядков используют линзы из оптических пластмасс [14]. Включение в оптические схемы указанных коррекционных элементов перспективно для решения актуальных задач миниатюризации репродукционных объективов, повышения их разрешающей способности, снижения световых потерь и рассеянного света. Далее приведены патентные примеры объективов-аналогов, в которых применены указанные выше оптические элементы.

Объектив с применением АЛ и улучшенной хроматической коррекцией (см. рис. 1) [15]. Объектив имеет следующие оптические характеристики: заднее фокусное расстояние $f' = 34,59$ мм; угловое поле $2\omega = 64^\circ$; относительное отверстие (1:K) = 1:1,45; задний фокальный отрезок $S'_{F'}$ = 37,98 мм; расстояние от первой до последней

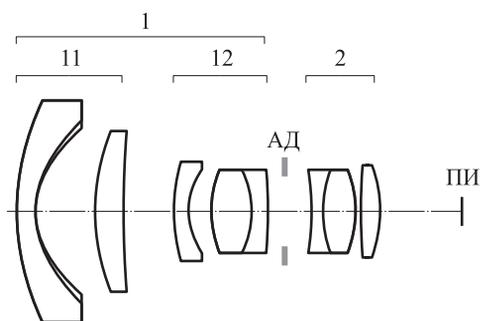


Рис. 3. Схема объектива по патенту США 7,843,651 [17]:

11, 12, 2 — первая, вторая и третья группы структурной схемы объектива; 1 — эквивалентная группа при переходе к двухгрупповой структурной схеме объектива; АД — апертурная диафрагма; ПИ — плоскость изображения

вершины оптических поверхностей $L_{об} = 88,95$ мм; рабочий спектральный диапазон представлен длинами волн: $\lambda_0 = 0,587$ мкм; $\lambda_1 = 0,436$ мкм; $\lambda_2 = 0,656$ мкм. Такой объектив относится к особо светосильным, широкоугольным реверсивным телеобъективам компактной длины. Структурная схема образована двумя группами (1 и 2) элементов, оптическая схема содержит 12 линз, включая две АП десятого порядка. Первая АП представляет вогнутую поверхность второго отрицательного мениска (по ходу лучей); вторая АП — вогнутую поверхность последнего положительного мениска. В объективе приняты дополнительные меры для улучшения коррекции aberrаций широких наклонных пучков, а именно: за счет применения в склеенных линзах групп 1 и 2 элементов из оптического стекла с высокими значениями показателя преломления. Так, в первой (по ходу лучей) склейке ее двояковыпуклая положительная линза выполнена из стекла со следующими значениями: показатель преломления (линия d) $n_d = 1,83481$, коэффициент дисперсии (число Аббе) $v_d = 42,7$; в отрицательной линзе группы 2 создан ахроматический радиус путем склейки двояковогнутой отрицательной линзы из оптического стекла с $n_d = 1,80000$; $v_d = 29,9$ и двояковыпуклой положительной линзой с $n_d = 1,80400$; $v_d = 46,6$. Улучшение коррекции хроматизма положения достигнуто также за счет применения в расположенной вблизи АД положительной линзе ПА (см. рис. 1) низкодисперсного стекла ($n_d = 1,49700$; $v_d = 81,5$) с аномальным ходом частной дисперсии.

Объектив с применением ДЛ (см. рис. 2) [16]. Оптические характеристики объектива: заднее фокусное расстояние $f' = 27,14$ мм; угловое поле $2\omega = 77,1^\circ$; относительное отверстие (1:К) = 1:1,85; расстояние от первой до последней вершины оптических поверхностей $L_{об} = 66,46$ мм; рабочий спектральный диапазон представлен длинами волн объектива: $\lambda_0 = 0,587$ мкм; $\lambda_1 = 0,436$ мкм; $\lambda_2 = 0,656$ мкм. Данный объектив относится к особосветосильным, широкоугольным реверсивным телеобъективам компактной длины. Схема содержит две группы из 11 линз, включая две АЛ и один дифракционный элемент. Построен по описанной выше [1, 2, 12] классической схеме широкоугольного светосильного объектива. Современные специализированные коррекционные элементы применены во второй половине силового положительного компонента: выпуклая поверхность расположенного вблизи АД отрицательного мениска представляет собой АП восьмого порядка; выпуклая поверхность одиночного положительного мениска — АП восьмого порядка; внутренняя поверхность последнего оптического элемента схемы является дифракционной и обеспечивает коррекцию хроматизма увеличения.

Объектив с применением гибридной асферической линзы (см. рис. 3) [17]. По аналогии с [18], гибридной асферической линзой

(ГАЛ) является склеенный оптический элемент на основе толстой сферической линзы из стекла с высоким значением показателя преломления и тонкой линзы из оптической пластмассы с существенно более низким значением показателя преломления, в которой асферической выполнена граничащая с воздухом поверхность.

Объектив имеет следующие оптические характеристики: заднее фокусное расстояние $f' = 15,45$ мм; угловое поле $2\omega = 85,92^\circ$; относительное отверстие $(1:K) = 1:4,1$; задний фокальный отрезок $S'_{f'} = 37,49$ мм; расстояние от первой до последней вершины оптических поверхностей $L_{об} = 41,82$ мм; рабочий спектральный диапазон представлен длинами волн $\lambda_0 = 0,587$ мкм; $\lambda_1 = 0,436$ мкм; $\lambda_2 = 0,656$ мкм. В данной системе обеспечено наиболее широкое из рассматриваемых примеров поле при высоком значении коэффициента реверсивности $K_F = S'_{f'}/f' = 2,4$. Структурная схема образована тремя группами (11, 12, 2); группы 11 и 12 могут быть объединены в эквивалентную группу 1. Оптическая схема содержит девять линз, включая одну ГАЛ, которой является фронтальный отрицательный мениск с глубокой вогнутой АП восьмого порядка. При этом толстая сферическая линза с поверхностями номеров 1–2 имеет $n_d = 1,80400$; $v_d = 46,6$, а в тонкой АЛ с поверхностями 2–3 $n_d = 1,52972$; $v_d = 42,70$ (нумерация поверхностей последовательная слева направо). Исполнение элемента в виде ГАЛ представляет существенный интерес, так как обеспечивает введение комплекса коррекционных параметров и технологическую реализацию глубокой АП с высоким градиентом асферичности.

При проектировании и производстве линзовых репродукционных объективов с высоким качеством полихроматического изображения в расширенных относительно традиционных спектральных областях, т. е. в ближних УФ- и ИК-областях, специалист решает задачу выбора оптических материалов, которые достаточно прозрачны в указанных спектральных областях. Традиционными и универсальными материалами для разработки объективов высокой прозрачности в области спектра от $\lambda_1 = 0,23$ мкм до ближней ИК-области являются флюорит и плавленный кварц [9, 19, 20]. Однако в этом случае происходит существенное ограничение номенклатуры оптических сред материалами с относительно низкими показателями преломления. Как следствие, в объективах с высокими значениями относительного отверстия и поля возможно возникновение проблем при обеспечении высокого разрешения: затруднения возникают прежде всего при решении задач, связанных с устранением полевых aberrаций. В частности, запрещение размещения на заднем отрезке объектива оптических элементов (что и имеет место при получении в объективе увеличенного значения заднего отрезка) делает невозможным применение поле-

вых коррекционных линз для исправления кривизны поля. Принципиальное решение указанной проблемы возможно при включении в схему толстых менисков [20], но этот путь связан с возрастанием осевой толщины линз и, как следствие, увеличением потерь света в результате поглощения. Однако в объективах, работающих в несколько суженных спектральных диапазонах (от 0,34 мкм и выше), можно использовать ряд современных марок оптического стекла, что в значительной степени снимает указанные выше проблемы. Такая возможность показана в [21] путем анализа характеристик, включая спектральные коэффициенты поглощения, оптических стекол известных фирм — производителей оптических сред (SCHOTT, ФРГ, и OHARA, Япония) [21].

Заключение. Анализ совокупности оптических, габаритных и качественных характеристик проекта монофокального линзового репродукционного объектива для видеомикропроекции показал, что их значения соответствуют или превосходят аналогичные показатели высококачественных фотографических объективов современных проекционных, репродукционных и телевизионных видеоустройств. В результате систематизированного исследования значений и совокупности этих характеристик и коррелированных с ними данных, полученных из различных информационных источников, определены классифицирующие признаки обсуждаемой оптической системы и на их основе выбраны группы объективов, которые могут в той или иной мере рассматриваться в качестве аналогов проекта репродукционного объектива. Анализ источников показал, что для обоснования и выбора структурной схемы объектива данного класса продуктивно использовать концептуальные принципы, которые сформулированы в результате исследований, посвященных расчетам светосильных и широкоугольных объективов с увеличенным задним фокальным отрезком (вплоть до реверсивных телеобъективов) и с телецентрическим или близким к нему ходом главных лучей в пространстве изображений [1, 2, 12]. Этим принципам соответствуют также структурные схемы современных проекционных объективов видеопроекторов по технологии дисплейных модуляторов, которые могут быть использованы в качестве объективов-аналогов при расчете репродукционного объектива. Для группы проекционных объективов проведены анализ и систематизация их технических характеристик, сформулированы выводы о закономерностях строения структуры схем, выявлены приемы и актуальные коррекционные элементы для целенаправленного исправления отдельных типов аберраций. К последним прежде всего отнесены современные оптические элементы — асферические линзы, дифракционные элементы и гибридные асферические линзы. Обсужден комплекс проблем, возникающих в связи с

выбором оптических материалов в объективах с высокой прозрачностью при условии расширения рабочего спектрального диапазона в ближнюю УФ- и ИК-области, и перспективы их решения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волосов Д.С. *Фотографическая оптика*. Москва, Искусство, 1971, 671 с.
- [2] Волосов Д.С. *Фотографическая оптика: Теория, основы проектирования, оптические характеристики*. 2-е изд. Москва, Искусство, 1978, 543 с.
- [3] Слюсарев Г.Г. *Расчет оптических систем*. Ленинград, Машиностроение, 1975, 640 с.
- [4] Русинов М.М. *Техническая оптика*. Ленинград, Машиностроение, 1979, 323 с.
- [5] *Патентное бюро США*. URL: <http://www.uspto.gov/> (дата обращения 11.08.2013).
- [6] Анитропов Р.В., Лившиц И.Л., Свищук Д.В. Предпосылки построения экспертной системы композиции объективов. *Известия вузов. Сер. Приборостроение*, 2010, т. 53, № 5, с. 77–78.
- [7] Лившиц И.Л., Сальников А.В., Unchung Cho. Выбор исходной системы для расчета объективов. *Оптический журнал*, 2007, т. 74, № 11, с. 74–78.
- [8] Бронштейн И.Г., Зверев В.А., Лившиц И.Л. Выбор оптической схемы и расчет малогабаритных объективов для мобильных телефонов. *Оптический журнал*, 2009, т. 76, № 5, с. 25–31.
- [9] Фролов Д.Н. Синтез оптических систем линзовых микрообъективов. *Оптический журнал*, 2002, т. 69, № 9, с. 16–20.
- [10] *ZEMAX Optical Design Program*. User's Guide. Version 10.0. Tucson (Arizona, USA), Focus Software, Inc., 2003, 478 p.
- [11] Сысоева С. МОЕМС — доступные технологии генерации и сканирования оптической информации. *Компоненты и технологии*, 2010, № 8, с. 33–40.
- [12] Иванов П.Д. *Некоторые особенности расчета широкоугольных и светосильных объективов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МВТУ, 1964, 16 с.
- [13] Марчук С.М. Широкоугольный проекционный объектив для системы отображения информации. *Оптический журнал*, 2006, т. 73, № 12, с. 27–29.
- [14] Minefuji N. *Zoom lens and projector*. Patent No. US 7,667,898, Feb. 23, 2010. URL: <http://www.uspto.gov/> (дата обращения 11.08.2013).
- [15] Hatada T. *Optical system and image pickup apparatus having the same*. Patent No. US 7,944,625, May 17.2011. URL: <http://www.uspto.gov/> (дата обращения 11.08.2013).
- [16] Eguchi K. *Image pickup optical system and image pickup apparatus including the same*. Patent No. US 7,738,182, Jun. 15, 2010. URL: <http://www.uspto.gov/> (дата обращения 11.08.2013).
- [17] Kanazashi Y. *Wide-angle lens system*. Patent No. US 7,843,651, Nov. 30, 2010. URL: <http://www.uspto.gov/> (дата обращения 11.08.2013).
- [18] Ровенская Т.С., Столбцова Е.С. Исследование асферической гибридной линзы в качестве базовой линзы объектива. *Сб. тр. IX Междунар. конф. «Прикладная оптика–2010»*. 18–22 октября 2010 г., Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербург, Гос. оптический ин-т им. С. И. Вавилова, 2010, т. 1(1), с. 22–24.
- [19] Tada E., Ito T. *Ultraviolet imaging system*. Patent No. US 7,057,804 B2, Jun. 6, 2006. URL: <http://www.uspto.gov/> (дата обращения 15.08.2013).
- [20] Панов В. А., Андреев Л. Н. *Оптика микроскопов*. Ленинград, Машиностроение, 1976, 432 с.

- [21] Ровенская Т.С., Сергеева А.Д. Проблемы проектирования объективов для спектрального диапазона, включающего видимую и ближние УФ- и ИК-области спектра. *Сб. докл. 13-й науч-техн. конф. «Медико-технические технологии на страже здоровья»*. 25 сентября — 02 октября 2011г., о. Майорка, Испания. Москва, НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, с. 135–142.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Т.С. Ровенская. Проблемы и тенденции в проектировании светосильного репродукционного объектива для микропроекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/830.html>

Ровенская Тамара Сергеевна родилась в 1947 г., окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: проектирование оптико-электронных устройств и систем, абберационные расчеты оптических систем. e-mail: rovtv@yandex.ru