

## ОБЪЕКТИВЫ-АПОХРОМАТЫ ДЛЯ ЛЮБИТЕЛЬСКОЙ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ АСТРОНОМИИ

© 2013 г. А. А. Шаров\*, канд. техн. наук; В. И. Молев\*\*, канд. техн. наук; О. В. Понин\*; Ю. Б. Грудзино\*; В. В. Фуфурин\*

\* Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино, Московская обл.

\*\* Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва

E-mail: otd22@lzos.ru

Рассмотрены особенности объективов, предназначенных для любительских и профессиональных астрономических наблюдений. В целях достижения апохроматической коррекции в схемах объективов-рефракторов применен крон с особым ходом дисперсии марки ОК4, технология получения высококачественных заготовок которого позволила создать апохроматические объективы с диаметром входного зрачка до 304 мм. Разработаны экспериментальные составы стекла, позволяющие получать апохроматические системы из двух линз.

**Ключевые слова:** объектив, вторичный спектр, апохроматическая коррекция.

Коды OCIS: 220.0220, 220.3620

Поступила в редакцию 30.08.2012

Линзовые системы получили широкое распространение в астрономических приборах, решающих широкий круг наблюдательных задач. В частности, телескопы-рефракторы диаметром до 1 м успешно используются для наблюдения двойных звезд, тонких планетных деталей, в астрометрии, а также для фотографирования больших участков неба. Линзовые телескопы пользуются большой популярностью у любителей астрономии. При этом качество изображения любительского телескопа ни в чем не должно уступать профессиональной системе. Это обусловлено как стремлением любителей максимально эффективно использовать относительно небольшой световой диаметр системы, так и задачами наблюдений и даже их определенным научным значением. Как отмечает известный английский популяризатор астрономии П. Мур: "...астрономия до сих пор остается почти единственной научной дисциплиной, где важную роль играют любительские исследования. Работа любителей высоко оценивается профессиональными астрономами, которые в некоторых областях полагаются на нее" [1].

Дисперсия преломляющих материалов приводит к возникновению хроматических аберраций, устранение которых является сложной

расчетной задачей, решение которой требует особого подхода не только на этапе расчета, но и на этапе изготовления системы, включая операции контроля.

При наличии в системе не менее двух стекол различных марок всегда можно подбором оптических сил отдельных линз системы свести в одну точку на оси два луча двух различных длин волн (ахроматическая коррекция). При этом лучи других длин волн не пересекают ось в той же точке, т. е. в системе имеется так называемый вторичный спектр.

Как известно, вторичный спектр зависит от относительной частной дисперсии  $p$  стекол в данной области спектра. У стекол с обычным ходом дисперсии относительная частная дисперсия и коэффициент дисперсии определяют, соответственно, как

$$p = (n_{F'} - n_e) / (n_{F'} - n_{C'}), \\ v = (n_e - 1) / (n_{F'} - n_{C'}),$$

где  $n_{F'}$ ,  $n_e$ ,  $n_{C'}$  — показатели преломления для спектральных линий  $F'$ ,  $e$ ,  $C'$  соответственно (видимая область спектра). Они связаны зависимостью, близкой к линейной, что определяет величину  $\delta s'$  вторичного спектра объектива (в случае использования стекол двух марок с константами  $p_1$ ,  $v_1$  и  $p_2$ ,  $v_2$ ) [2]

$$\delta s' = -f' \frac{p_2 - p_1}{v_2 - v_1},$$

где  $f'$  – фокусное расстояние объектива.

Очевидно, что для системы из двух стекол с обычным ходом дисперсии вторичный спектр будет близок к нулю в случае равенства относительных частных дисперсий этих стекол при неравных значениях  $v$ . Однако, подобные стекла, с близкими относительными частными дисперсиями, не обеспечивают достаточно большой разности ( $v_2 - v_1$ ), что в двухлинзовой схеме приводит к большим оптическим силам линз и, как следствие, ограничивает относительное отверстие системы.

Следовательно, величина вторичного спектра в подавляющем большинстве случаев почти не зависит от выбора стекол: у двухлинзового объектива, исправленного в видимой спектральной области, вторичный спектр равен примерно  $1/2000$  фокусного расстояния [2].

Таким образом, для создания объективов с исправленным вторичным спектром (апохроматическая коррекция) необходимы оптические стекла с особыми свойствами, которые по сравнению со стеклами с обычным ходом дисперсии и с таким же коэффициентом дисперсии, обладают уменьшенной (курц-флинты и курц-кроны) или увеличенной (ланг-флинты и ланг-кроны) относительной частной дисперсией в коротковолновой области спектра.

Традиционно наилучшим материалом для создания апохроматических комбинаций в видимой области спектра благодаря экстремально большому отклонению относительной частной дисперсии от нормальной прямой считался оптический кристалл фторида кальция – флюорит.

Однако, анизотропия физико-механических свойств, а также блочная структура роста кристаллов флюорита определяют неодинаковость скоростей обработки различных участков поверхности при полировании детали, что не позволяет получать требуемую высокую степень точности формообразования поверхностей крупногабаритных линз [3]. Эта же особенность данного материала обуславливает проблематичность получения заготовок больших размеров с высокой степенью оптической однородности.

Отечественными учеными созданы сорта оптического стекла с особым ходом дисперсии – фторфосфатные кроны, которые обладают оптическими характеристиками, не усту-

пающими флюориту [4]. Лыткаринский завод оптического стекла (ОАО ЛЗОС) по оригинальной технологии производит стекло из группы фторфосфатных кронов – особый крон марки ОК4. На сегодняшний день ОК4 – единственный фторфосфатный крон, производство которого промышленно освоено в России; он включен в действующий Государственный стандарт на оптическое стекло (ГОСТ 3514-94).

Обладая близкими к флюориту значениями оптических констант, стекло ОК4 в то же время имеет ряд преимуществ перед флюоритом. Это, прежде всего, более высокая оптическая однородность – отсутствие спайности, характерной для оптических кристаллов флюорита.

В ОАО ЛЗОС отработана технология получения высококачественных заготовок стекла ОК4 диаметром до 350 мм, позволяющая создавать апохроматические объективы с диаметром входного зрачка до 304 мм. Из-за высокой кристаллизационной способности фторфосфатного стекла марки ОК4 технология его варки и выработки в виде заготовок диаметром до 350 мм имеет свои особенности. В частности, варка стекла происходит в платиновом тигле с герметичным затвором для размешивания (не конденсированная система), что позволяет в процессе отлива стекломассы сохранять необходимые оптические постоянные, обеспечивать отсутствие свильности и, как следствие, высокую оптическую однородность.

Главной особенностью линзовых объективов телескопов, используемых, в частности, в любительской астрономии, является обеспечение высокого уровня качества изображения при возможно большем относительном отверстии системы. При этом оптическая система не должна быть слишком сложной и дорогостоящей. Поэтому наиболее распространенные на сегодняшний день схемы астрономических объективов-апохроматов – трехлинзовые. Трехлинзовая “тонкая” система обладает необходимым количеством свободных коррекционных параметров для исправления сферической аберрации, комы, хроматизма положения, а достаточно широкий выбор стекол различных марок дает возможность исправления в системе вторичного спектра и минимизации сферохроматической аберрации [2].

Оптические системы астрономических линзовых объективов ЛЗОС построены по трехлинзовой схеме с использованием стекла марки ОК4 в качестве одного из компонентов. В настоящее время серийно выпускаются более

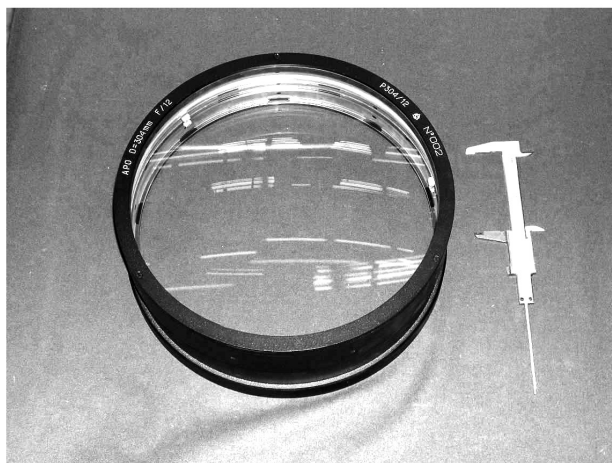


Рис. 1. Объектив-апохромат диаметром 304 мм (относительное отверстие 1:12).

20 моделей с диаметром входного зрачка от 100 до 304 мм и относительными отверстиями 1:6–1:12.

Среди разработанных крупногабаритных систем следует выделить объективы с диаметром входного зрачка 203 мм (выпускаются модели с относительными отверстиями 1:9 и 1:7), 228 мм (1:9), 254 мм (1:9) и 304 мм (1:12) (рис. 1).

На качество изготовленного объектива существенное влияние могут оказывать деформации поверхностей и натяжения в материале оптических деталей, возникающие при их закреплении в оправе. Для обеспечения сохранения качества оптической системы как при эксплуатации, так и в процессе ее контроля необходима механическая конструкция, которая, имея более высокую надежность крепления, одновременно обеспечивала бы минимальные деформации оптических деталей объектива.

Для средне- и крупногабаритных оптических компонентов разработана конструкция оправы и способ крепления, обеспечивающие минимальные деформации оптических деталей при высокой надежности крепления [5].

Используется технология закрепления линз в оправе с применением специальных полимеризующихся материалов. Установка линз в оправе осуществляется с обеспечением диаметральных и осевых зазоров до 5 мкм, а центрирование линз проводится с точностями до 1/2 мкм.

Основу технологической базы сборочного процесса составляет уникальное контрольно-измерительное оборудование – оптические скамьи для технологического и аттестационного

контроля объективов, оснащенные эталонными коллиматорами с фокусным расстоянием до 25 м.

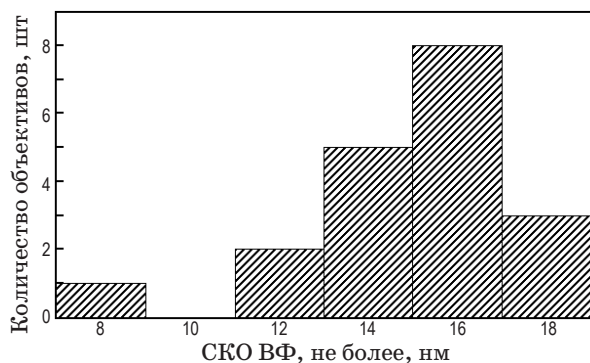
С целью сохранения расчетного качества изображения в реальной системе на всех этапах технологического процесса осуществляется контроль основных характеристик оптических материалов и деталей, а также оптимизация системы на основе фактически измеренных величин. Ее основными этапами являются пересчет оптической схемы по данным измерений показателей преломления стекол конкретных варок, комплектация системы по результатам измерения параметров фактически изготовленных оптических деталей (радиусов и толщин) и окончательная юстировка системы в процессе сборки. На этапе окончательной сборки оптической системы юстировка осуществляется по показаниям интерферометрического контроля.

С учетом особенностей работы объективов данного класса юстировка системы проводится по результатам анализа деформаций волнового фронта, измеренных на длине волны  $\lambda = 532$  нм, которая примерно соответствует среднему значению длин волн максимумов чувствительности человеческого глаза для дневного и сумеречного зрения. Оптимизация ошибок изготовления системы на  $\lambda = 532$  нм позволяет не только гарантировать высокое качество монохроматического изображения, но и сохранить оптимальный расчетный баланс сферохроматических аберраций во всем рабочем диапазоне спектра.

Анализ измеренных деформаций волнового фронта позволяет объективно оценить качество изображения, формируемого оптической системой, установить его соответствие расчету, выявить отклонения, приводящие к снижению качества изображения, и определить меры, необходимые для их компенсации.

Совокупность этих мер позволяет обеспечить среднеквадратическую деформацию волнового фронта (СКО ВФ) изготовленной системы, гарантированно не превышающую  $1/30 \lambda$  ( $\lambda = 532$  нм). В качестве примера на диаграмме рис. 2 приведены статистические данные по СКО ВФ изготовленных объективов с диаметром входного зрачка 254 мм.

Следует заметить, что комбинации серийно выпускаемых стекол (например, ОК4–К8) позволяют реализовать апохроматическую систему и из двух линз, но относительные отверстия такого объектива не превысят 1:12–1:15 (при-



**Рис. 2.** Данные контроля деформаций волнового фронта объективов-апохроматов с диаметром входного зрачка 254 мм.

чина – недостаточно большая разность чисел Аббе  $\Delta\nu = 27,66$ ). Такая система не обеспечивает решения задач астрофотографии, увеличивает длину трубы телескопа и потому не практична.

Для обеспечения возможности создания более светосильных апохроматов поставлена задача создания стекла с относительной частной дисперсией, близкой к ОК4, и увеличенной разностью чисел Аббе. В результате проведенной специалистами ОАО ЛЗОС работы создан ряд составов нового стекла типа “курц-флинт”, наиболее интересным из которых является состав с условным заводским номером 25, имеющий следующие оптические константы:

$$n_e = 1,5300, p = 0,5078, \nu = 55,82.$$

В паре с ОК4 такое стекло обеспечивает  $\Delta\nu = 35,71$ .

Для более полной оценки характеристик данного состава стекла был рассчитан двухлинзовый объектив с использованием комбинации стекол ОК4–состав № 25 с диаметром зрачка 152 мм и относительным отверстием 1:8.

Полученная двухлинзовая схема практически не уступает выпускаемому в настоящее время трехлинзовому аналогу по хроматической коррекции, но имеет меньшую сферическую aberrацию высшего порядка, что может существенно облегчить юстировку и в итоге обеспечить лучшее качество готовой системы.

Таким образом, можно утверждать, что качество рассчитанной на основе нового стекла двухлинзовой системы отвечает требованиям, обычно предъявляемым к качеству астрономических апохроматов.

## Заключение

Технологические возможности современного производства позволяют серийно выпускать линзовые объективы с апохроматической коррекцией и качеством изображения, близким к дифракционному пределу. Дальнейший прогресс систем данного класса лежит, прежде всего, в развитии технологии производства оптических материалов: увеличении диаметра заготовок стекла с особым ходом дисперсии, получаемых промышленным способом, и внедрении стекол новых марок для создания систем с улучшенными характеристиками.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мур П. Астрономия с Патриком Муром. М.: ФАИР-ПРЕСС, 1999. С. 5.
2. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение. 1969. 672 с.
3. Справочник технолога-оптика / Под ред. Окатова М.А. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
4. Петровский Г.Т. Современные оптические материалы. К 100-летию со дня рождения академика И.В. Гребенщикова // ОМП. 1987. № 11. С. 58.
5. Шаров А.А. Оправа и способ крепления оптических компонентов в оправе // Патент РФ № 2257600 G02B 7/02. 2005.