

Страхов Андрей Александрович, преподаватель кафедры ОПД

Московское высшее общевойсковое командное училище

Россия, г. Москва

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ КРОНОВ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ВТОРИЧНОГО СПЕКТРА В ОБЪЕКТИВАХ ТЕЛЕСКОПОВ

Аннотация: В статье рассмотрен вопрос выбора оптических материалов для построения объективов с укороченным вторичным спектром для телескопических систем различного назначения. Обращено внимание на особенности расположения сверхтяжелых кронов (СТК) на диаграмме Аббе. Отмечена возможность применения СТК вместо ОФ для коррекции вторичного спектра объективов. Приведены конструктивные данные и оптические характеристики таких объективов с увеличенным относительным отверстием, а также сравнение оптических параметров рассчитанного объектива с аналогом на курцфлинте.

Ключевые слова: объектив, вторичный спектр, сверхтяжелый крон, нормальная дисперсия, курцфлинт, сферохроматизм, коррекция аберраций.

Annotation: The article deals with the selection of optical materials for the design of lenses with a short secondary spectrum for telescopic systems for various purposes. Attention is drawn to the features of the arrangement of super heavy crowns (СТК) on the Abbe diagram. The possibility of using СТК instead of OF to correct the secondary spectrum of the objective lenses is noted. The design data and optical characteristics of such lenses with an increased relative aperture are presented, as well as a comparison of the optical parameters of the designed lenses with analogues on kurzflints.

Keywords: objective lens, secondary spectrum, super heavy crown, normal dispersion, kurzflint, spherochromatic aberration, correction of aberrations.

Объективы телескопов-рефракторов имеют перед объективами телескопов-рефлекторов существенное преимущество в виде отсутствия центрального экранирования. Центральное экранирование рефлекторов заметно снижает контраст изображения. Однако, чтобы полностью реализовать это преимущество, необходимо исправить типичную для преломляющей оптики aberrацию – хроматизм положения. Обычные ахроматы – дублеты не обеспечивают необходимого уровня коррекции хроматизма положения, а их остаточный хроматизм (вторичный спектр) имеет величину порядка $1/2000$ фокусного расстояния объектива [1; 2]. Для получения более качественного изображения требуются объективы с укороченным вторичным спектром – полу-апохроматы, а лучше – апохроматы.

Обычно для уменьшения вторичного спектра ахроматов используют оптические материалы с особым ходом дисперсии (курцфлинт, лангкрон), на базе которых строят дублеты и триплеты. Последние обладают лучшей степенью исправления вторичного спектра [1; 2]. Другая альтернатива - схемы диалитов и триалитов на обычных стеклах [3; 4]. Недостатками этих решений являются, в первом случае, - низкая технологичность и дороговизна материалов с особым ходом дисперсии, а во втором - большие величины воздушных промежутков между компонентами, что ведет к усложнению конструкции, ее удорожанию и нестабильности взаимного положения компонентов в процессе эксплуатации.

В схемах диалитов и триалитов используются самые простые и дешевые стекла, но принципиально важным условием является наличие больших (порядка фокусного расстояния объектива) воздушных промежутков между компонентами, что, по мнению автора, лишает эти схемы перспективы широкого использования. Что же касается объективов с малыми воздушными промежутками, здесь, как мы выясним, могут быть найдены новые решения, причем, без применения материалов с особым ходом дисперсии.

Обратимся к диаграмме Аббе, изображенной на рисунке 1 в координатах P - v . По горизонтальной оси здесь отложены числа Аббе v , а по вертикальной оси – относительные частные дисперсии $P_{F,d}$, вычисленные для каждого стекла по формуле:

$$P_{F,d} = n_F - n_d / n_F - n_C \quad (1),$$

где n_F , n_d и n_C – показатели преломления стекла для спектральных линий F, d и C соответственно.

На диаграмме точками изображены предварительно отобранные автором из каталогов ЛЗОС, Ohara и Schott стекла.

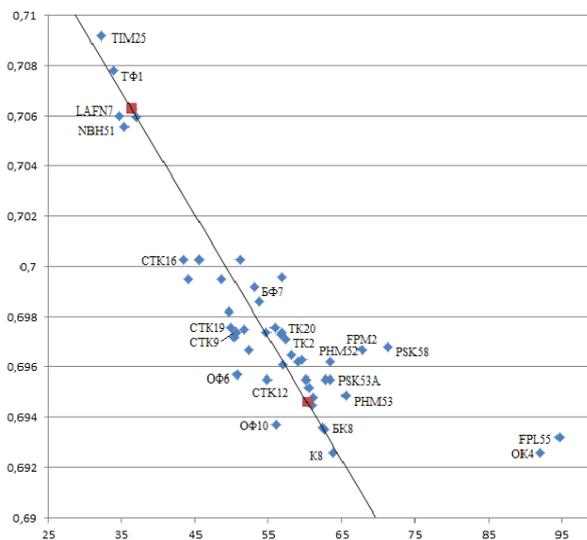


Рис.1 Диаграмма Аббе

Видно, что справа от нормальной прямой находятся кроны, простые и «особые» (или «лангкроны» - FPL55, ОК4), а слева – простые и «особые» флинты (или «курцфлинты» - ОФ) и сверхтяжелые кроны СТК. Заметим, что стекла СТК расположены на некотором удалении от «нормальной» прямой, которое, несколько меньше, чем у стекол ОФ. Однако если мы будем выбирать пару к стеклу из левой части диаграммы, то окажется, что такие пары, как СТК9-FPM2 или СТК19-PSK58 имеют неплохие перспективы для создания на их базе дублетов, обладающих укороченным вторичным спектром, и вполне могут составить конкуренцию парам на базе особых флинтов, таким, например, как ОФ6-PSK53А или ОФ6-PSK58. А если использовать дублет с расщепленной

линзой [2], то ввиду уменьшения оптических сил составляющих расщепленную линзу, возможны комбинации стекол СТК с другими кронами, менее удаленными от «нормальной» прямой. Таким образом, возможна, например, реализация таких комбинаций: ТК20-СТК19-ТК20, ТК2-СТК9-ТК2, PSK53A-СТК12-PSK53A и других. Основные принципы построения схем таких дублетов на базе сверхтяжелых кронов обсуждались в статье [5].

Недостатком рассмотренных схем является ограниченная светосила.

Относительные отверстия рассчитанных объективов не превышают величин 1:10 – 1:9.

С целью увеличения относительного отверстия объективов были предложены схемы с двумя расщепленными линзами – четырехлинзовые двухстекольные объективы. Схемы объективов были запатентованы [6; 7].

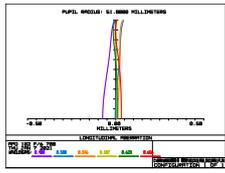
Ниже приведены конструктивные данные и оптические характеристики некоторых рассчитанных автором объективов на сверхтяжелых кронах с диаметром зрачка 102мм и относительным отверстием 1:7. Рабочий спектральный диапазон объективов F-C.

1. Объектив СТК12-РНМ51-СТК12-РНМ51

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO*	Standard	434.261454	V 21.000000	LZ_CTK12	52.000000 U
2*	Standard	150.554096	V 0.399907		52.000000 U
3*	Standard	163.191001	V 25.000000	S-PHM51	52.000000 U
4*	Standard	-183.482531	V 0.499864		52.000000 U
5*	Standard	-186.158073	V 7.000000	LZ_CTK12	P 52.000000 U
6*	Standard	210.335518	V 0.399868		52.000000 U
7*	Standard	175.868983	V 22.000000	S-PHM51	P 52.000000 U
8*	Standard	-816.107627	V 683.285250		52.000000 U
IMA	Standard	Infinity			3.118048

Рис.2 Конструктивные данные объектива СТК12-РНМ51-СТК12-РНМ51

На рисунках 3-5 представлены данные, характеризующие степень исправления аберраций объектива.



2. Объектив СТК19-РНМ52-СТК19-РНМ52

Surf:Type		Radius		Thickness		Glass		Semi-Diameter	
OBJ	Standard	Infinity		Infinity				Infinity	
STO*	Standard	578.051191	V	21.000000		LZ_CTK19		52.000000	U
2*	Standard	397.457923	V	0.400267	V			52.000000	U
3*	Standard	145.053017	V	25.000000		S-PHM52		52.000000	U
4*	Standard	-332.349757	V	9.079075	V			52.000000	U
5*	Standard	-308.781273	V	7.000000		LZ_CTK19		52.000000	U
6*	Standard	129.830223	V	25.101052	V			52.000000	U
7*	Standard	192.873859	V	22.000000		S-PHM52		52.000000	U
8*	Standard	-2678.067694	V	638.297456	V			52.000000	U
IMA	Standard	Infinity						3.127832	

Рис.6 Конструктивные данные объектива СТК19-РНМ52-СТК19-РНМ52

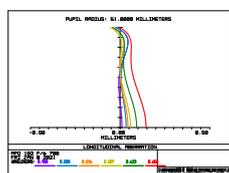


Рис.7 Продольные абберации объектива
СТК19-РНМ52-СТК19-РНМ52

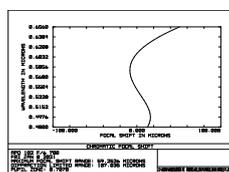


Рис.8 Продольная хроматическая абберация объектива

СТК19-PHM52-СТК19-PHM52

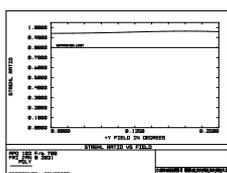


Рис.9 Число Штреля для объектива СТК19-PHM52-СТК19-PHM52

3. Объектив PSK58-СТК9-PSK58 СТК9

Surf:Type		Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO+	Standard	151.184055 V	21.000000	N-PSK58	52.000000 U
2*	Standard	1868.530760 V	12.000883 V		52.000000 U
3*	Standard	913.412452 V	10.000000	LZ_СТК9	52.000000 U
4*	Standard	124.452745 V	13.236592 V		52.000000 U
5*	Standard	176.184442 V	25.000000	N-PSK58 P	52.000000 U
6*	Standard	1017.737243 V	40.000000		52.000000 U
7*	Standard	-114.845054 V	10.000000	LZ_СТК9 P	52.000000 U
8*	Standard	-116.991184 V	597.489859 V		52.000000 U
IMA	Standard	Infinity			3.121336

Рис.10 Конструктивные данные объектива PSK58-СТК9-PSK58 СТК9

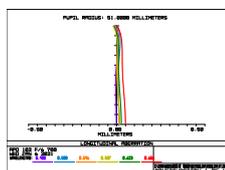


Рис.11 Продольные абберации объектива

PSK58-CTK9-PSK58-CTK9

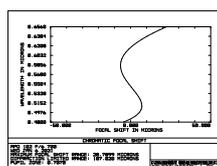


Рис.12 Продольная хроматическая абберация объектива

PSK58-CTK9-PSK58 CTK9

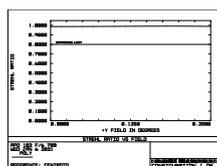


Рис.13 Число Штреля для объектива PSK58-CTK9-PSK58 CTK9

4. Объектив OF6-PSK53A-OF6-PSK53A

На рисунках 14-16 представлены характеристики объектива.

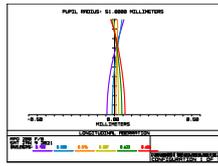


Рис.14 Продольные aberrации объектива OF6-PSK53A-OF6-PSK53A

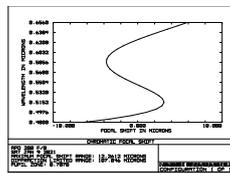


Рис.15 Продольная хроматическая aberrация объектива OF6-PSK53A-OF6-PSK53A

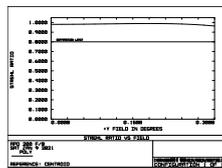


Рис.16 Число Штреля с учетом поля зрения для объектива OF6-PSK53A-OF6-PSK53A

Оптимизация всех объективов проводилась в программной среде Zemax [8].

Объектив №4 на базе особого флинта ОФ6 приведен для сравнения его характеристик с характеристиками объективов на базе сверхтяжелых кронов.

Анализ приведенных выше материалов показывает, что предложенные схемы объективов на сверхтяжелых кронах обеспечивают высокий уровень коррекции вторичного спектра и сферохроматизма. При этом геометрические aberrации также исправлены хорошо, о чем свидетельствует высокое число Штреля.

Объективы имеют схожие характеристики с аналогами на «особых» флинтах по качеству изображения. Следует подчеркнуть, что некоторые из приведенных схем объективов на СТК могут работать при большем относительном отверстии и в увеличенном спектральном диапазоне без заметного ухудшения качества изображения. Так, например, был рассчитан объектив СТК9-PSK58-СТК9-PSK58, работающий в спектральном диапазоне 430-700нм при относительном отверстии 1:6, что говорит об имеющемся коррекционном потенциале описанных выше схем на СТК.

Таким образом, предложенные схемные решения могут быть использованы при разработке телескопических приборов различного назначения.

Библиографический список:

1. Попов Г.М. Современная астрономическая оптика. М.; Наука, 1988, 192с.
2. Максutow Д.Д. Астрономическая оптика. Л., Наука, 1979, 395с.
3. Yang Q.H., Zhao B.C., Zhou R.K. «Correction of secondary spectrum based on normal dispersion glasses». // Guangzi Xuebao, Vol.37, №4, 2008, pp. 772-775.
4. Duplov R. Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses // Appl. Opt. 2006. V. 45. №21. pp. 5164-5167.

5. Дмитерко Р.А., Страхов А.А. Исследование коррекционных свойств апохроматов на стеклах с нормальной дисперсией. // «StudNet». – №11/2020. – С.66.

6. Пат. на полезную модель 192789 Российская Федерация, СПК G 02 В 9/34. Четырехлинзовый апохроматический объектив. / Страхов А.А., Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Фоминский Д.В., Соловьев А.; заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ, Москва. - № 2019120533, заявл. 02.07.19; опубл. 01.10.19, Бюл. № 28. – 2 с.

7. Пат. на полезную модель 196376 Российская Федерация, СПК G 02 В 9/34. Четырехлинзовый апохроматический объектив. / Страхов А.А., Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Фоминский Д.В., Соловьев А.; заявитель и патентообладатель НИЯУ МИФИ, Москва. – № 2019138469, заявл. 28.11.19; опубл. 26.02.20, Бюл. № 6. – 2 с.

8. ZEMAX 13 R2 SP4x64. Optical Design Program. 2013.