УДК 535.31

Дмитерко Руслан Алексеевич
кандидат физико-математических наук.
доцент кафедры ОПД
Московское высшее общевойсковое командное училище
Россия, г. Москва
Страхов Андрей Александрович
преподаватель кафедры ОПД
Московское высшее общевойсковое командное училище
Россия, г. Москва

АПОХРОМАТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация: *В статье рассмотрен алгоритм поиска апохроматических триад стекол для объективов телескопических систем. Предложены оптические схемы апохроматических объективов на стеклах с нормальным ходом дисперсии.*

Ключевые слова: *телескопическая система, объектив, апохромат, стекло, нормальный ход дисперсии.*

Dmiterko Ruslan Alekseevich
Doctor of Philosophy (Ph.D) in phisics and mathematics
associate Professor of OPD Department Moscow higher arms command school
Russia, Moscow
Strakhov Andrei Alexandrovich
teacher of the OPD Department Moscow higher arms command school
Russia, Moscow

APOCHROMATIC LENSES OF TELESCOPIC SYSTEMS

Annotation: *The article considers an algorithm for searching for apochromatic triads of glasses for lenses of telescopic systems. Optical schemes of apochromatic lenses on "normal" glasses are proposed.*

Key words: *telescopic system, lens, APO lens, optical glass, normal dispersion.*

К объективам телескопических систем предъявляются достаточно жесткие требования с точки зрения коррекции аберраций. Основной аберрацией, ограничивающей качество изображения телескопической системы, является хроматизм положения. Задача проектировщика состоит в том, чтобы как минимум три длины волны из рабочего спектрального диапазона оптической системы были сведены в общем фокусе, а остальные находились от него на минимальном расстоянии, при этом объектив должен строить изображение удаленного объекта дифракционного качества. Таким образом, необходимым требованием является апохроматическая коррекция с исправлением сферической аберрации на уровне, не хуже $\lambda/4$ по волновому фронту, где λ – средняя длина волны рабочего спектрального диапазона объектива.

Такая задача обычно решается применением в оптической схеме объектива фтор-фосфатных стекол (кронов) с особым ходом дисперсии и числами Аббе $\nu \geq 90$ или кристаллов типа флюорита (CaF_2) [1].

Однако это решение не всегда подходит для объективов телескопических систем специального назначения в силу ряда физических свойств этих оптических материалов (высокий коэффициент линейного расширения, низкая твердость, низкая технологичность в производстве, высокая цена, низкая устойчивость к воздействию внешних факторов).

Известны также схемы апохроматов, построенных на базе особых флинтов (ОФ), например, в [2] приведены триады КФ5-ОФ4-ТФ5, ЛК7-ОФ4-ТФ8 и др. Особые флинты обладают лучшей по сравнению с особыми кронами технологичностью и устойчивостью к внешним факторам, однако, триады на их

основе имеют гораздо меньшие коррекционные возможности при довольно высокой себестоимости.

В связи с этим, возникает необходимость поиска альтернативных «триад» - оптических материалов, лишенных недостатков фтор-фосфатных кронов и кристаллов с одной стороны, и имеющих лучшие коррекционные возможности, чем триады на основе особых флинтов, с другой стороны.

Авторами была поставлена задача поиска таких триад и расчета объективов на их основе.

Для решения указанной задачи были рассмотрены каталоги трех основных производителей оптического стекла: ЛЗОС, SCHOTT и OHARA. Все стекла этих производителей были сведены в единую базу. Стекла с особым ходом дисперсии, а также прямые аналоги были исключены из базы данных. Кроме того, были исключены некоторые низко технологичные стекла и стекла, неустойчивые к воздействию внешних факторов. Таким образом, в качестве исходных материалов для формирования «триад» отобраны 165 стекол, перечисленных в Таблице 1.

Таблица 1.

Стекла для формирования триад

№	Марка стекла	Фирма	№	Марка стекла	Фирма	№	Марка стекла	Фирма
1	F5	SCHOTT	54	ТК-12	ЛЗОС	107	S-LAL61	OHARA
2	K7	SCHOTT	55	ТК-14	ЛЗОС	108	S-BSM2	OHARA
3	K10	SCHOTT	56	ТК-16	ЛЗОС	109	S-BSM4	OHARA
4	LF5	SCHOTT	57	ТК-20	ЛЗОС	110	S-BSM9	OHARA
5	LLF1	SCHOTT	58	ТК-21	ЛЗОС	111	S-BSM10	OHARA
6	N-BAF4	SCHOTT	59	ТК-23	ЛЗОС	112	S-BSM14	OHARA
7	N-BAF10	SCHOTT	60	СТК-3	ЛЗОС	113	S-BSM15	OHARA
8	N-BAF51	SCHOTT	61	СТК-8	ЛЗОС	114	S-BSM16	OHARA
9	N-BAF52	SCHOTT	62	СТК-9	ЛЗОС	115	S-BSM18	OHARA
10	N-BAK2	SCHOTT	63	СТК-19	ЛЗОС	116	S-BSM22	OHARA

11	N-BAK4	SCHOTT	64	KF-6	ЛЗОС	117	S-BSM25	OHARA
12	N-BALF4	SCHOTT	65	KF-7	ЛЗОС	118	S-BSM28	OHARA
13	N-BALF5	SCHOTT	66	BF-1	ЛЗОС	119	S-BSM71	OHARA
14	N-BASF2	SCHOTT	67	BF-6	ЛЗОС	120	S-BSM81	OHARA
15	N-BASF64	SCHOTT	68	BF-11	ЛЗОС	121	S-BAL2	OHARA
16	N-BK10	SCHOTT	69	BF-21	ЛЗОС	122	S-BAL3	OHARA
17	N-BK7	SCHOTT	70	BF-24	ЛЗОС	123	S-BAL11	OHARA
18	N-F2	SCHOTT	71	BF-25	ЛЗОС	124	S-BAL12	OHARA
19	N-FK5	SCHOTT	72	LF-5	ЛЗОС	131	S-BAM12	OHARA
20	N-K5	SCHOTT	73	LF-9	ЛЗОС	132	S-BAH10	OHARA
21	N-KF9	SCHOTT	74	F-1	ЛЗОС	133	S-BAH11	OHARA
22	N-LAF7	SCHOTT	75	F-4	ЛЗОС	134	S-BAH27	OHARA
23	N-LAK8	SCHOTT	76	BK-4	ЛЗОС	135	S-BAH28	OHARA
24	N-LAK9	SCHOTT	77	BK-6	ЛЗОС	136	S-BAH32	OHARA
25	N-LAK10	SCHOTT	78	BK-8	ЛЗОС	137	S-TIM2	OHARA
26	N-LAK22	SCHOTT	79	BK-10	ЛЗОС	138	S-TIM25	OHARA
27	N-LAK33A	SCHOTT	80	N-SF11	SCHOTT	139	S-PHM52	OHARA
28	N-LAK34	SCHOTT	81	PSK3	SCHOTT	140	S-PHM53	OHARA

29	N-LASF41	SCHOTT	82	PSK53A	SCHOTT	141	S-TIH1	OHARA
30	N-LASF43	SCHOTT	83	S-LAM2	OHARA	142	S-TIH10	OHARA
31	N-LASF44	SCHOTT	84	S-LAM3	OHARA	143	L-LAM69	OHARA
32	N-LASF46A	SCHOTT	85	S-LAM7	OHARA	144	L-LAM72	OHARA
33	N-PSK53A	SCHOTT	86	S-LAM51	OHARA	145	L-LAH85	OHARA
34	N-ZK7	SCHOTT	87	S-LAM52	OHARA	146	L-TIH53	OHARA
35	SF1	SCHOTT	88	S-LAM54	OHARA	147	L-LAH84	OHARA
36	SF2	SCHOTT	89	S-LAM55	OHARA	148	L-NBH54	OHARA
37	SF4	SCHOTT	90	S-LAM58	OHARA	149	L-PHL1	OHARA
38	SF6	SCHOTT	91	S-LAM59	OHARA	150	L-PHL2	OHARA
39	SF10	SCHOTT	92	S-LAM60	OHARA	151	S-NBH51	OHARA
40	SF57	SCHOTT	93	S-LAM61	OHARA	152	S-NBH53	OHARA
41	N-SF5	SCHOTT	94	S-LAM66	OHARA	153	S-NBH55	OHARA
42	N-SF8	SCHOTT	95	S-LAL7	OHARA	154	S-LAH51	OHARA
43	SF56A	SCHOTT	96	S-LAL8	OHARA	155	S-LAH52	OHARA
44	N-LAK33A	SCHOTT	97	S-LAL9	OHARA	156	S-LAH53	OHARA
45	N-LASF31A	SCHOTT	98	S-LAL10	OHARA	157	S-LAH58	OHARA
46	LLF1	SCHOTT	99	S-LAL12	OHARA	158	S-LAH59	OHARA

47	N-PSK58	SCHOTT	100	S-LAL13	OHARA	159	S-LAH60	OHARA
48	N-LAK33B	SCHOTT	101	S-LAL14	OHARA	160	S-LAH63	OHARA
49	N-LASF46B	SCHOTT	102	S-LAL18	OHARA	161	S-LAH64	OHARA
50	S-TIM1	OHARA	103	S-LAL54	OHARA	162	S-LAH66	OHARA
51	S-NSL36	OHARA	104	S-LAL56	OHARA	163	S-LAH71	OHARA
52	ТК-2	ЛЗОС	105	S-LAL58	OHARA	164	S-NSL3	OHARA
53	ТК-9	ЛЗОС	106	S-LAL59	OHARA	165	S-NPH53	OHARA

Для отбора «триад» из данного списка авторами была разработана программа, позволяющая формировать «триады» для тонких триплетов без воздушных промежутков. Критерием отбора явилось условие минимума суммарной кривизны всех преломляющих поверхностей тонкого триплета. Программа работает по следующему алгоритму: сначала рассчитываются тонкие триплеты без воздушных промежутков путем перебора всех возможных комбинаций стекол из составленной базы данных. На этом этапе контролируется суммарная кривизна преломляющих поверхностей триплета, сферическая аберрация и хроматизм положения. На следующем этапе производится отбор наиболее перспективных триад исходя из минимальной суммарной кривизны, минимальной сферической аберрации и минимального хроматизма положения. Затем производится процедура «утолщения» линз, т.е. вводятся конечные толщины и воздушные промежутки. После этого наилучшие по выше приведенным критериям триады оптимизируются в программе ZEMAX.

В результате проведенных расчетов, были получены триады, из которых отобрано 50 наиболее перспективных. Выбранные триады сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Триады стекол для апохроматов

№	триада	№	триада
1	S-NSL3 - СТК19 - S-NSL3	26	БК-6 - СТК19 - ТК-2
2	К-20 - N-LAK10 - БК-6	27	БК-6 - СТК19 - БФ-1
3	ТК-20 - СТК19 - S-PHM52	28	ТК-12 - СТК-19 - БФ-11
4	S-BSM2 - СТК19 - S-PHM52	29	БК-8 - СТК-19 - БФ-11
5	БК-6 - СТК19 - PHM52	30	ТК-20 - СТК-9 -ТК-20
6	S-PHM52 - СТК19 - S-PHM52	31	ТК-2 - СТК-9 -ТК-2
7	ТК-21 - СТК-19 - S-PHM53	32	БК-6 - СТК-9 - ТК-2
8	ТК-14 - СТК19 - ТК-20	33	ТК-20 - СТК-9 - S-PHM52
9	ТК-16 - СТК19 - ТК-20	34	БК-10 - СТК-9 - ТК-2
10	ТК-16 - СТК19 - ТК-16	35	БК-6 - СТК19 - ТК-16
11	ТК-23 - СТК19 - БФ-11	36	БК-10 - СТК-19 - S-PHM53
12	ТК-12 - СТК-9 - ТК-21	37	БК-6 - СТК-19 - БК-6
13	ТК-12 - СТК19 - S-BSM25	38	БК-6 - СТК-19 - БК-10
14	БФ-7 - N-LAF34 - БК-6	39	S-PHM53 - СТК12 - N-PSK53
15	S-TIH10 - LAFN7 - S-PHM52	40	S-PHM53 - СТК12 - S-PHM53
16	S-TIM25 - LAFN7 - БФ11	41	S-PHM52-N-LAK33A-S-PHM52
17	N-PSK58 - LAFN7 - СТК16	42	S-NSL3 - N-LAK33A - S-PHM52
18	СТК-19 - PSK53A - СТК-19	43	S-TIM25 - S-NBH51 - ТК-2
19	СТК-19 - S-PHM52 - СТК-19	44	S-TIM25 - S-NBH51 - ТК20
20	СТК-9 - S-PHM52 - СТК-19	45	S-TIM25 - S-NBH51 - БК-4
21	СТК-19 - N-PSK58 - СТК-19	46	S-TIM25 - S-NBH51 - БК-6
22	N-PSK58 - СТК19 - N-PSK58	47	S-TIM25 - S-NBH51 - БК-10
23	N-PSK53 - СТК12 - N-PSK53	48	S-TIM25 - S-NBH51 - БФ11
24	S-PHM51 - СТК12 - S-PHM51	49	S-TIM25 - S-NBH8 - БФ11
25	S-PHM53 - СТК12 - S-PHM51	50	КФ-6 - СТК-12 - S-PHM53

Из таблицы следует, что возможны варианты построения апохроматов как из трех разных марок стекол, так и из двух марок стекол (триады №№ 1, 6, 10, 21, 40 и др.).

Порядок расположения стекол внутри триад имеет большое значение, нарушение указанного в таблице 2 порядка расположения стекол приводит к ухудшению коррекционных возможностей триады. Однако для некоторых «двух-стекольных» триад возможны два варианта расположения стекол внутри триады, например, триады №№ 6 и 19.

Детальное исследование коррекционных возможностей и особенностей оптических схем объективов на базе полученных триад еще предстоит сделать, здесь же приведем в качестве примера, оптическую схему объектива на базе триады № 31 (ТК-2 - СТК-9 - ТК-2). [3]. На рисунке 1 дана оптическая схема объектива.

Объектив состоит из двух оптически связанных компонентов, разделенных воздушным промежутком d_1. Первый компонент содержит одну положительную линзу, выполненную из стекла ТК-2, второй – две линзы: двояковогнутую, выполненную из стекла марки СТК-9 и положительный мениск, выполненный из стекла марки ТК-2, разделенные воздушным промежутком d_2. Объектив имеет следующие оптические характеристики:

-фокусное расстояние 990мм;

- относительное отверстие 1:10;

- рабочий спектральный диапазон 0,434 – 0,700нм;

- угловое поле в пространстве предметов +/-0,25^o.

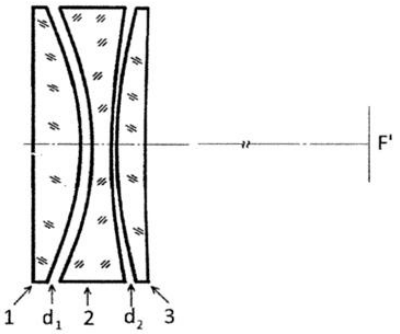


Рисунок 1. Оптическая схема объектива

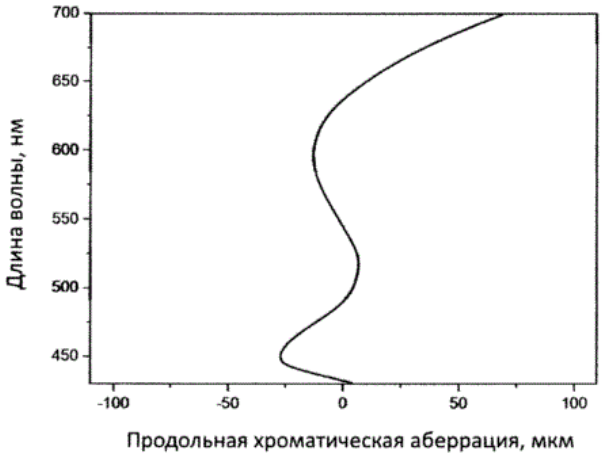
Конструктивные параметры объектива приведены в таблице 3.

Таблица 3

	Радиус кривизны, мм	**Толщина, мм**	**Показатель преломления, n_d**	**Число Аббе, ν_d**
1	179,02	20,0	1,572	57,33
	-296,86			
		d_1	2,0	
2	-366,22	5,0	1,744	50,26
	109,25			
		d_2	1,77	
3	112,06	24,0	1,572	57,33
	959,26			

На рисунке 2 приведен график хроматической кривой. Хорошо виден W-образный характер кривой, т.е. четыре длины волны из рабочего спектрального диапазона оптической системы сведены в общем фокусе, а величина хроматической аберрации – 78,8мкм, что составляет 1/12560 часть от фокусного расстояния объектива.

На рисунке 3 приведен график зависимости полихроматического числа Штреля от поля зрения объектива. Видно, что объектив строит изображение дифракционного качества в пределах рабочего поля зрения.



Риунок.2. График хроматической кривой

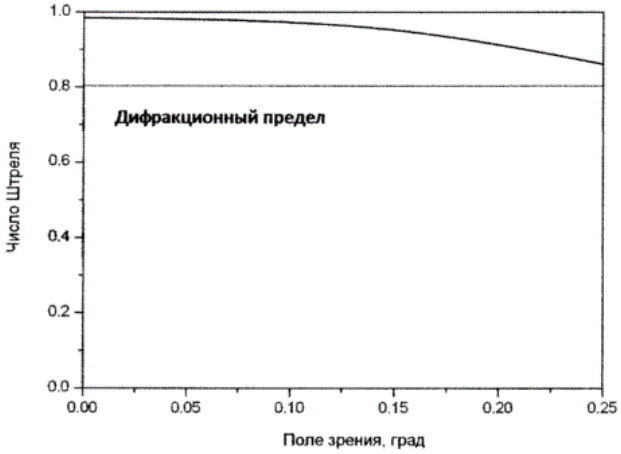


Рисунок 3. Число Штреля с учетом поля зрения

Таким образом, нам удалось найти абсолютно новые апохроматические триады стекол с нормальным ходом дисперсии. На базе этих триад могут быть разработаны объективы для телескопических систем широкого применения, в том числе, для специальных применений.

В качестве примера приведен расчет одного из возможных вариантов объектива-апохромата.

Использованные источники:

1. Архипов С.А., Кушнарев К.Г., Скляров С.Н. Апохроматические объективы для гиперспектральной аппаратуры // Контенант. – 2013. – Т.12, №1, – С. 65-68.
2. Попов Г.М. Современная астрономическая оптика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. -192с.
3. Пат. на полезную модель 185717 Российская Федерация, МПК^7 G 02 B 9/16, G 02 B 11/08. Двухкомпонентный апохроматический объектив. / Страхов А.А., Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Фоминский Д.В.; заявитель и патентообладатель Москва. НИЯУ МИФИ. – № 2018132324, заявл. 11.09.18; опубл. 14.12.18, Бюл. № 35. – 2 с.