

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317

## АПОХРОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИЗ СТЕКОЛ С “ОБЫЧНЫМ” ХОДОМ ДИСПЕРСИИ

© 2012 г. А. П. Грамматин, доктор техн. наук; Е. А. Цыганок

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: llenal@mail.ru

Показана возможность устранения вторичного спектра в двухкомпонентной системе, выполненной из стекол с “обычным” ходом дисперсии, путем компьютерного моделирования. Необходимыми условиями для этого являются воздушный промежуток между компонентами, соизмеримый с фокусным расстоянием системы, и большой хроматизм положения второго компонента. Приведены оптические схемы и aberrации апохроматических объективов, состоящих из стекол с “обычным” ходом дисперсии.

**Ключевые слова:** апохроматические системы, стекла с “обычным” ходом дисперсии, вторичный спектр, хроматические aberrации.

Коды OCIS: 080.3620, 220.0220

Поступила в редакцию 14.10.2011

В длиннофокусных линзовых оптических системах, работающих в широком спектральном диапазоне длин волн, aberrацией, ограничивающей качество изображения, как правило, является вторичный спектр. Традиционно, для его исправления применяются стекла с “особым” ходом дисперсии либо кристаллы, которые обладают большими коэффициентами температурного изменения показателя преломления, что приводит к терморасфокусировке.

При любом количестве линз, входящих в компонент, выполненных из стекол с “обычным” ходом дисперсии, оптические константы которых лежат вблизи “нормальной” прямой на диаграмме зависимости относительных частных дисперсий от коэффициентов дисперсии [1], вторичный спектр остается неизменным. Для компонента из двух тонких линз он прямо пропорционален фокусному расстоянию и в спектральном диапазоне  $F'-C'$  определяется по формуле

$$S'_{F'} - S'_e \approx 0,57 \times 10^{-3} f', \quad (1)$$

для спектрального диапазона 0,4–0,9 мкм вторичный спектр увеличивается примерно в 7,7 раз (рис. 1)

$$S'_{0,4} - S'_e \approx 0,43 \times 10^{-2} f'. \quad (2)$$

Традиционно в оптических системах для одновременного устранения хроматизмов положения и увеличения применяют ахромати-

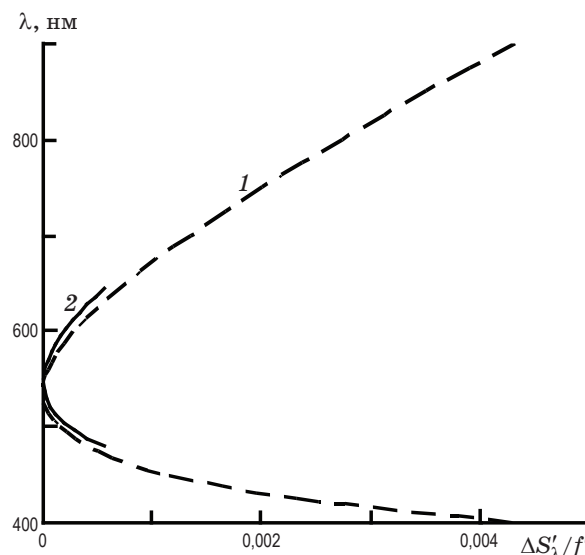


Рис. 1. Вторичный спектр оптической системы из стекол ЛК3 и ТФ10. 1 – вторичный спектр при ахроматизации в диапазоне 400–900 нм, 2 – в диапазоне 480–643,8 нм.

зованные компоненты. Как было показано в работе [2], при увеличении расстояния между такими компонентами можно уменьшить вторичный спектр примерно на 40%. Винн [3] рассмотрел возможность устранения вторичного спектра без использования стекол с “особым” ходом дисперсии в случае, когда компоненты не ахроматизованы. Эти системы состоят из двух компонентов, разделенных большим воздушным промежутком, где, по мнению автора, за счет разницы высот параксиальных лучей для различных длин волн на втором компоненте происходит компенсация вторичного спектра. На основании выводов Винна были проведены расчеты объективов телескопов без использования стекол с “особым” ходом дисперсии, но наилучшее исправление вторичного спектра в результате достигается у объективов, состоящих из трех различных стекол, одно из которых имеет “немного аномальную дисперсию” [4].

Для исследования возможностей исправления вторичного спектра в двухкомпонентных системах за счет изменения расстояния между компонентами в настоящей работе проведено компьютерное моделирование с использованием программного комплекса САРО. В качестве первого компонента системы использовалась одиночная линза, выполненная из тяжелого флинта ТФ10 ( $C_I = -0,0397$ ). Второй компо-

нент – две тонкие линзы, выполненные из легкого крона ЛКЗ и ТФ10. Толщина линз принималась равной нулю. Воздушный промежуток между компонентами изменялся в диапазоне  $(0,1-1,5)f'$ , где  $f'$  – фокусное расстояние системы, равное 150 мм. Выполнялась автоматизированная коррекция хроматизма положения параксиальных лучей для длин волн диапазона  $F'-C'$  и вторичного спектра для длин волн  $F'-e$ . Коррекционными параметрами системы являлись углы первого параксиального луча с осью  $\alpha_3$  и  $\alpha_5$ , что равносильно изменению относительных оптических сил линз системы. Вторичный спектр, определяемый как расстояние между параксиальными изображениями для основной и крайних длин волн, во всех случаях практически равнялся нулю. Установлено, что значения вторичного спектра во всем исследуемом спектральном диапазоне будут определяться другими длинами волн:  $\lambda_{1\alpha} = 505,5$  мкм,  $\lambda_{2\alpha} = 599$  мкм в спектральном интервале 480–643,8 мкм и  $\lambda_{1\alpha} = 700$  мкм,  $\lambda_{2\alpha} \approx 450$  мкм в спектральном интервале 400–900 мкм (табл. 1). Поэтому под вторичным спектром будем понимать расстояние между этими экстремумами. Ранее наличие двух и более экстремумов наблюдалось только при использовании в системах “особых” стекол либо кристаллов. В табл. 2 приведены исследованные зависимости вторичного спектра от

**Таблица 1.** Изменение значений вторичного спектра в зависимости от длины волны

$\lambda$ , нм	900	850	800	750	700	650	600	550	500	450	400
$S'_\lambda - S'_e$	0	-0,046	-0,080	-0,100	-0,106	-0,093	-0,060	0,005	0,066	0,121	0

**Таблица 2.** Зависимости вторичного спектра от расстояния между компонентами оптической системы

$d$	$C_{II}$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$S'_{\lambda_{1\alpha}} - S'_{\lambda_{2\alpha}}$
200	0,115	0,493	8,900	-7,422	0,0079
175	0,142	0,553	8,893	-7,632	0,0083
150	0,192	0,632	8,915	-8,292	0,0089
125	0,311	0,740	8,971	-7,915	0,0096
100	1,149	0,896	9,082	-8,824	0,0106
75	-0,788	1,146	9,330	-9,672	0,0110
50	-0,225	1,617	9,843	-11,182	0,0144
25	-0,117	2,907	11,360	-15,059	0,0203
15	-0,070	11,489	20,675	-37,673	0,0264

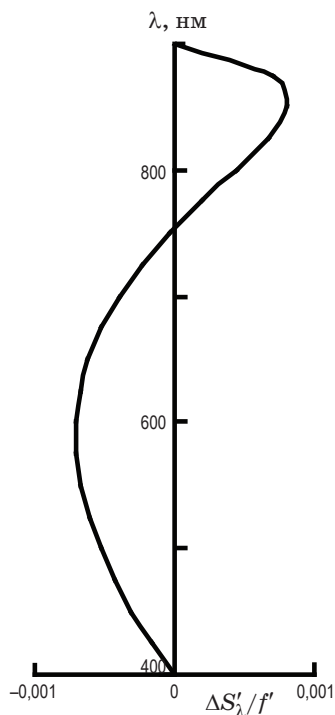


Рис. 2. Вторичный спектр оптической системы из стекол ЛКЗ и ТФ10 с воздушным промежутком между компонентами, равным фокусному расстоянию.

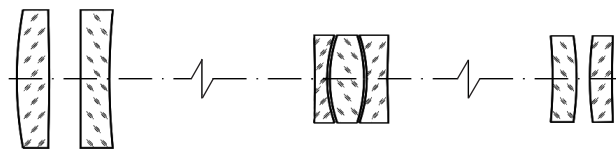


Рис. 3. Оптическая схема апохроматического объектива с  $f' = 500$  мм,  $K = 5$ .

Таблица 3. Число Штреля для объектива с  $f' = 500$  мм,  $K = 5$

$y'$	$e$	$F'$	$C'$
0	0,93	0,88	0,85
3,08	0,87	0,90	0,89
4,35	0,81	0,92	0,92

Таблица 4. Число Штреля для объектива с  $f' = 200$  мм,  $K = 5$  для диапазона 400–900 нм

$y'$	$e$	400 нм	900 нм	450 нм	625 нм
0	0,98	0,92	0,95	0,90	0,97
1,23	0,91	0,87	0,93	0,86	0,90
1,74	0,79	0,79	0,87	0,73	0,79

расстояния между компонентами. Для сравнения, согласно традиционной теории хроматизма, значение вторичного спектра в системе из этих стекол при фокусном расстоянии 150 мм в диапазоне длин волн  $F'-C'$  будет равным 0,088 мм (рис. 2). Значения вторичного спектра могут быть также уменьшены при замене легкого крона ЛКЗ на тяжелый ТК16 или ТК21.

Обратим внимание, что при малых воздушных промежутках основной параметр Г.Г. Слюсарева  $C$  (табл. 2) во втором компоненте достигает необычных значений, что приводит к необходимости использования чрезвычайно больших относительных оптических сил, входящих в этот компонент, и тем самым затрудняет реализацию его использования. Естественно, такие оптические системы неосуществимы. Начиная с воздушного промежутка, равного фокусному расстоянию, при разделении положительной линзы второго компонента на две, появляется возможность создания таких систем. Относительные оптические силы второго компонента могут быть уменьшены, если первый компонент выполнить из двух линз различных марок стекол.

При этом хроматизм увеличения объектива чрезвычайно велик (до 9%). Для его устранения необходимо применение третьего компонента.

Была получена оптическая система с фокусным расстоянием  $f' = 500$  мм, диафрагменным числом  $K = 5$  (рис. 3). Ее вторичный спектр равен 0,058 мм, что в 4,8 раз меньше значения вторичного спектра системы из “обычных” стекол, состоящей из тонких компонентов, разделенных малыми воздушными промежутками (0,285 мм). Значения числа Штреля этой системы представлены в табл. 3.

Был рассчитан объектив с  $f' = 200$  мм и диафрагменным числом  $K = 5$  для диапазона длин волн 400–900 нм, схема которого аналогична схеме, приведенной на рис. 3, обеспечивающий высокую чувствительность приборов сумеречного наблюдения. Значения числа Штреля для него представлены в табл. 4.

Таким образом, вторичный спектр может быть значительно уменьшен в оптических системах, состоящих из “обычных” стекол и работающих в широком спектральном диапазоне, причем, такие системы могут быть реализованы практически.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бесцветное оптическое стекло СССР. Каталог / Под ред. Петровского Г.Т. М.: Дом оптики, 1990. 130 с.
  2. Гальперн Д.Ю., Полтырева Е.С. Вторичный спектр оптических систем из линз конечной толщины // ОМП. 1974. № 9. С. 22–26.
  3. Wynne C.G. A comprehensive first-order theory of chromatic aberration secondary spectrum correction without special glasses // Opt. Acta. 1978. V. 25. № 8. P. 627–636.
  4. Duplov R. Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 21. P. 5164–5167.
-