
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317.2 681.7.012.2

А. В. ПРАВДИВЦЕВ

ОБЪЕКТИВ ДЛЯ ХРОМАТИЧЕСКОЙ СЕЛЕКЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ПРЕДМЕТА

Представлен расчет объектива, предназначенного для хроматической селекции спектральных компонентов изображения полихроматического кольцевого предмета, цвет которого на экране определяется величиной переднего отрезка оптической системы. Приведены рекомендации по проектированию систем такого рода.

Ключевые слова: проекционные объективы, оптимизация, хроматические aberrации.

В рамках международного семинара по оптическому проектированию “IODS’10” (International Optical Design Seminar — 2010) [1] был организован конкурс среди молодых специалистов, ученых, аспирантов и студентов. Третье место на конкурсе было присуждено автору настоящей статьи, в которой и представлено решение предложенной задачи.

Автор задачи В. Ульрих, директор Центра оптического проектирования компании “Carl Zeiss AG”, сформулировал ее следующим образом: необходимо рассчитать объектив, предназначенный для проецирования изображений разноцветных олимпийских колец на экран с большой четкостью. Предмет — бесконечно тонкое полихроматическое светящееся кольцо диаметром 10 мм; числовая апертура в пространстве предметов 0,2; увеличение, рассчитанное в параксиальной области от предмета до экрана, — $100\times$; длины волн λ : 480 нм (синяя), 546 нм (зеленая), 587 нм (желтая), 643 нм (красная). Оптическая система должна выделять кольцо определенного цвета путем перефокусировки. Поверхности линз должны быть поверхностями вращения, допустимо применение асферических поверхностей; количество линз не более 5. При проектировании необходимо использовать материалы только из каталогов оптического стекла фирм “Schott” и “Ohara” [2, 3]. Система не должна иметь виньетирования. Лучшим считается объектив, формирующий самое резкое изображение олимпийских колец одного размера на экране. Эффектами дифракции следует пренебречь.

Из анализа поставленной задачи следует, что она сформулирована неполно: например, не указаны величины переднего и заднего отрезков объектива, допустимое размытие колец и отклонение диаметра изображения колец от номинального значения. В этой связи для решения задачи были приняты следующие допущения: цель оптимизации — получить изображение всех колец требуемого цвета с диаметром 1 м и наименьшей толщиной, допускается наличие слабоконтрастного цветного ореола; плоскость изображения располагается на расстоянии 1 м от последней линзы. Из этого следует, что система должна обладать неисправленным

хроматизмом положения. В этом случае в плоскости наилучшей установки предмета для каждой длины волны будет сформировано резкое изображение кольца требуемого цвета.

Предварительно, до начала решения задачи, следует задать два критерия, по которым будет оцениваться результат:

1) средневзвешенный критерий

$$R = r_0 \sum_i r_i^{-1} / 3, \quad (1)$$

где r_0 — среднеквадратичный радиус пятна (СРП) рассеяния для основной в данной конфигурации объектива длины волны, r_i — радиусы пятен рассеяния для других длин волн;

2) критерий Чебышева

$$R_C = r_0 / \min r_i. \quad (2)$$

Далее будем использовать интегральные критерии, представляющие собой средние значения соответствующих критериев для всех длин волн.

Первый этап решения. Один из вариантов решения данной задачи — система с телецентрическим ходом лучей в пространстве изображений; в этом случае яркое кольцо будет располагаться на фоне цветного ореола. Серьезным недостатком этой схемы является сопоставимость габаритов линз с размером изображения. Так как по техническому заданию размер изображения составляет 1 м, от данного варианта следует отказаться.

Опишем поэтапно процесс создания системы. В качестве прототипа для первоначальной оптимизации был выбран проекционный объектив, разработанный автором ранее (рис. 1).

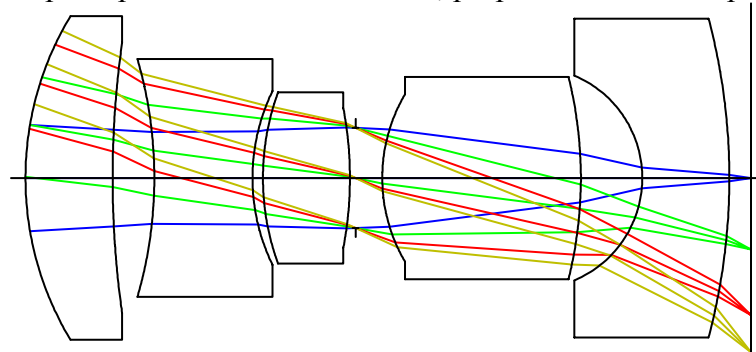


Рис. 1

Объектив, в контексте задачи, имеет следующие недостатки: относительное отверстие не соответствует заданному; не выполняются особые требования по формированию колец, размерам предмета и изображения. Несмотря на это, объектив удовлетворяет требованиям по количеству линз и качеству оптического изображения.

Оптимизация была осуществлена следующим образом.

1. Выполнен переход к расчету исходной схемы в прямом ходе лучей. Так как предметом является кольцо, трассировка лучей производится только для единственной полевой точки. Введение дополнительных полевых точек усложнит реализацию оптимизационного алгоритма по нахождению минимума функции качества.

2. На первом этапе рассматривалась система, в которой величина переднего отрезка задается разработчиком как конструктивное ограничение. Для каждой длины волны была создана конфигурация с величиной переднего отрезка от 1,6 до 1,9 мм с шагом 0,1 мм.

3. Для выполнения требования по формированию изображений колец одного размера в оптимизационную функцию вводился операнд, контролирующий высоту главного луча на поверхности изображения для соответствующей длины волны в каждой конфигурации. Получение резкого изображения колец выполняется заданием операндов, минимизирующих СРП для требуемой длины волны. СРП для остальных (паразитных) длин волн в данной конфигурации не контролировался.

4. Проведен ряд сеансов локальной оптимизации системы с межсеансным изменением набора варьируемых параметров, перестройкой функции качества и принудительным изменением конструктивных параметров: в частности, был убран воздушный промежуток между двумя последними линзами для лучшей коррекции аберраций.

5. В целях увеличения размытия цветного ореола передний отрезок был увеличен до 1,5, 2, 2,5 и 3 мм для длин волн 480, 546, 587 и 643 нм соответственно.

В результате оптимизации была получена схема, представленная на рис. 2, а.

Для оценки точности выделения колец определим, как меняется качество изображения в зависимости от величины переднего отрезка. Для этого найдем максимальный размер квадрата, в который собирается 95 % энергии для основной в данной конфигурации длины волны. Во всех конфигурациях это выполняется для квадрата со стороной 3 мм. Диаграмма зависимости концентрации энергии (E) в квадрате указанного размера для каждой длины волны от величины переднего отрезка (s) показана на рис. 2, б; центр квадрата располагается в центре масс пятна рассеяния.

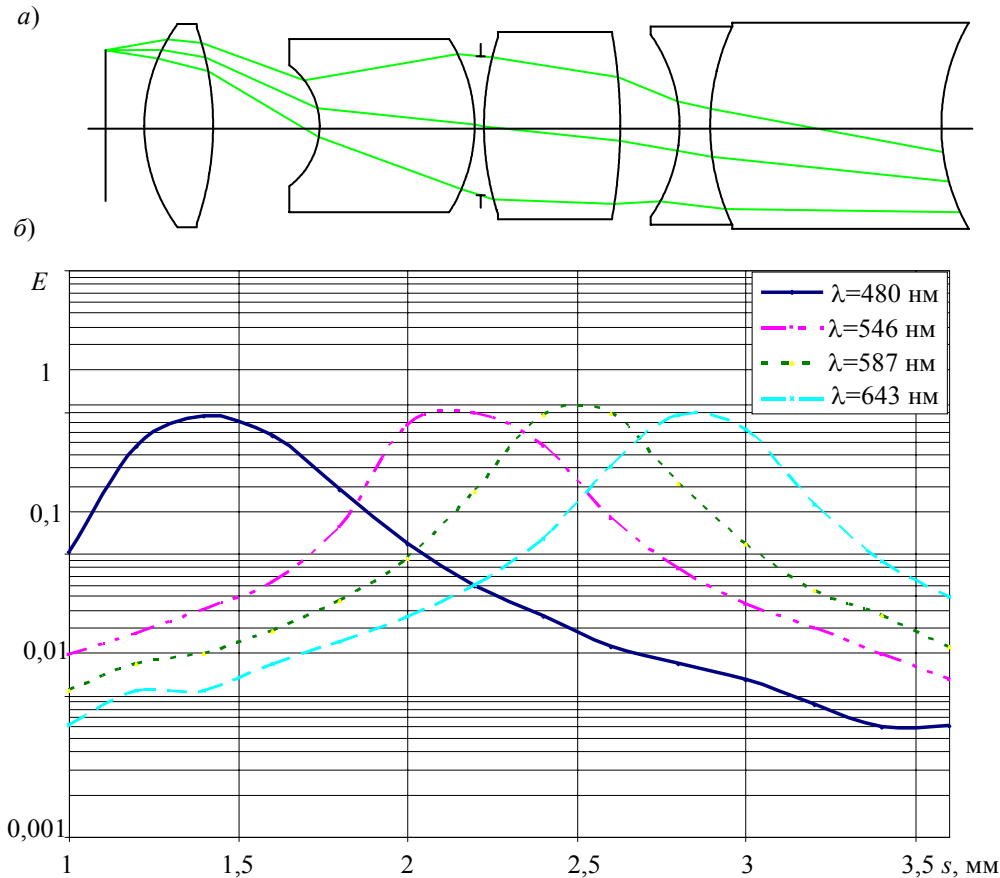


Рис. 2

Как видно из рисунка, система при указанных выше величинах переднего отрезка выделяет кольца требуемого цвета. Концентрация энергии для основной длины волны в точке фокусировки как минимум в 2 раза больше, чем для паразитных длин волн. Оказалось, что максимум концентрации для всех длин волн, кроме третьей, смещен относительно номинального положения. Это означает, что в процессе оптимизации для них не удалось совместить плоскость наилучшей установки предмета с заданной величиной переднего отрезка.

Полученная система удовлетворяет требованиям, указанным в задании. Изображение кольца имеет расфокусированный цветной ореол, минимальное отличие величин переднего отрезка в различных положениях составляет 0,4 мм. Однако данный вариант объектива имеет и недостатки: толстые линзы, форма последней поверхности является неудобной для нанесения просветляющих покрытий, диаметр колец по главному лучу отличается от номинального менее чем на 0,6 мм.

Так как в техническом задании не указаны численные значения допусков на нерезкость изображения колец и отклонения их диаметров от номинального значения, для исправления указанных недостатков продолжим оптимизацию. Для корректного сравнения данного варианта объектива с последующими рассчитаем интегральные коэффициенты: значение средневзвешенного критерия согласно формуле (1) равно 0,7009, критерия Чебышева (см. формулу (2)) — 0,3211.

Второй этап решения. На втором этапе оптимизации в целях обеспечения дополнительной степени свободы оптимизационного алгоритма вариант с жестким заданием величины переднего отрезка для различных длин волн был отклонен. Для увеличения хроматической разницы все материалы были заменены стеклом с самым низким показателем Аббе в каталогах “Ohara” и “Schott” (по данным каталогов программы Zemax [4]): это стекло S-NPH2 из каталога “Ohara”, показатель Аббе для которого составляет 18,89. В целях увеличения разницы между величинами переднего отрезка в различных конфигурациях в системе не использовалась склейка группы линз [5]. Кроме того, был увеличен вес операнда, контролирующего высоту главного луча на поверхности изображения, для более точного соблюдения размера колец в каждой конфигурации. Оптимизация, как и на первом этапе, проводилась по критерию наименьшего СРП для основной длины волны в данной конфигурации.

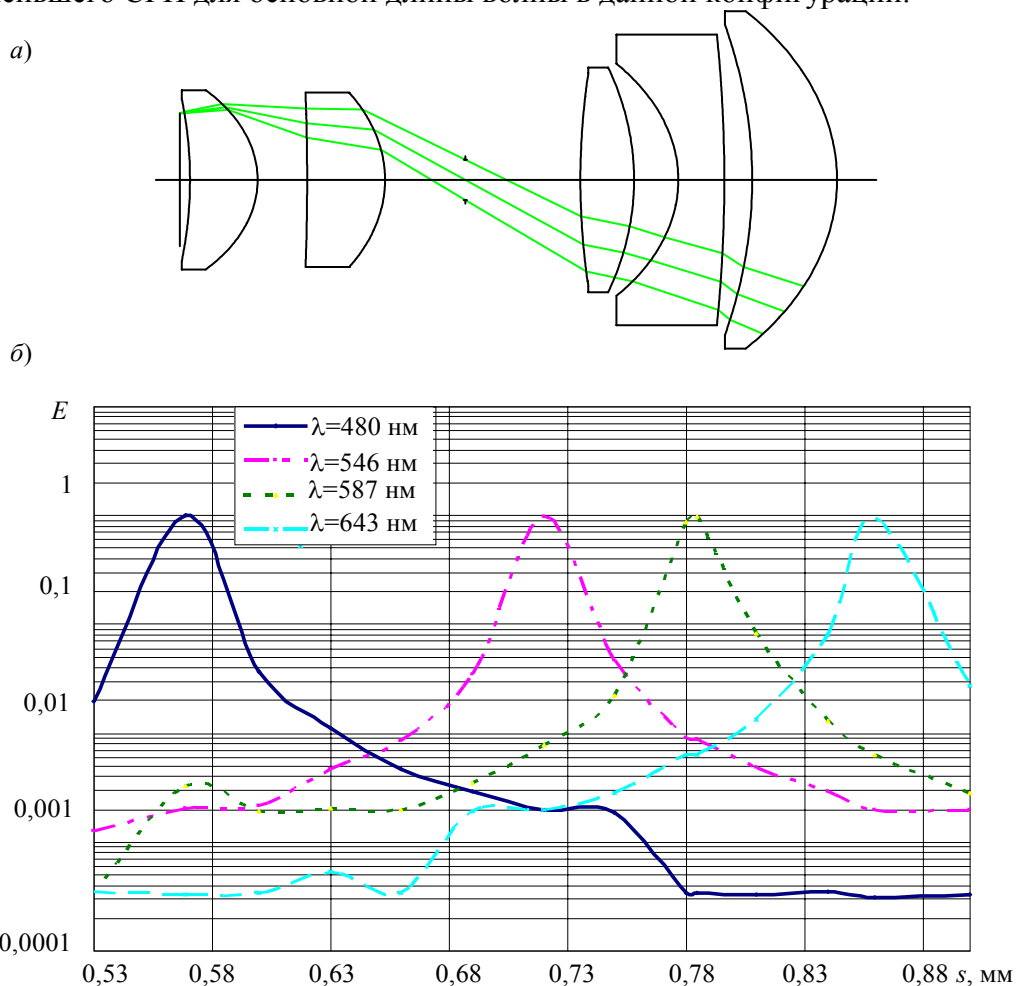


Рис. 3

В результате оптимизации получен 5-линзовый объектив (рис. 3, а), для которого интегральные критерии составляют 0,0791 и 0,0381, отклонение диаметра от номинального значения менее 4 мкм. Таким образом, по интегральным критериям удалось улучшить схему более чем в 8 раз. Отметим, что максимальный диаметр пятна рассеяния для основной длины волны в каждой конфигурации меньше диаметра кружка Эри. Критерий Штреля для основных длин волн составляет более 0,9, система обладает дифракционным качеством.

Оценим качество выделения колец аналогично тому, как это сделано для предыдущего варианта. В данной системе 95 % энергии для основной длины волны собирается в квадрате со стороной 0,266 мм (что в 11,2 раза лучше, чем данный показатель в предыдущей системе). На рис. 3, б показано значение концентрации энергии в зависимости от величины переднего отрезка: отчетливо видны 4 пика, соответствующие точкам фокусировки длин волн. Так как объект является полихроматическим, в изображении будут присутствовать все длины волн, поэтому важный вопрос при создании системы такого рода — поведение паразитных длин волн. Как видно из графика, концентрации энергии для паразитных в данной конфигурации длин волн более чем в 100 раз меньше концентрации энергии для основной длины волны, что гораздо лучше, чем в промежуточном варианте (см. рис. 2, б). Это говорит о том, что цветной ореол будет слабо заметен. Цветные кольца выделяются однозначно: в наихудшем случае (вторая и третья длины волн), разница между величиной переднего отрезка для двух соседних пиков по уровню 0,1 составляет 30 мкм.

Определим, как изменится качество системы при уменьшении количества линз. Обратим внимание на то, что последняя линза практически не меняет направления хода лучей, поэтому удалим ее. В результате оптимизации 4-линзового варианта объектива (рис. 4) с использованием исходной оптимизационной функции были получены следующие значения показателя качества: 0,0807 и 0,0393. Следует отметить, что в данном варианте разница между диаметрами изображений колец, определяемыми по главному лучу, составила менее 6 мкм. 4-линзовый объектив хуже 5-линзового по средневзвешенному критерию в 1,02 раз, по критерию Чебышева — в 1,031 раз, по отклонению диаметра изображений колец от номинального значения — в 1,2 раза.

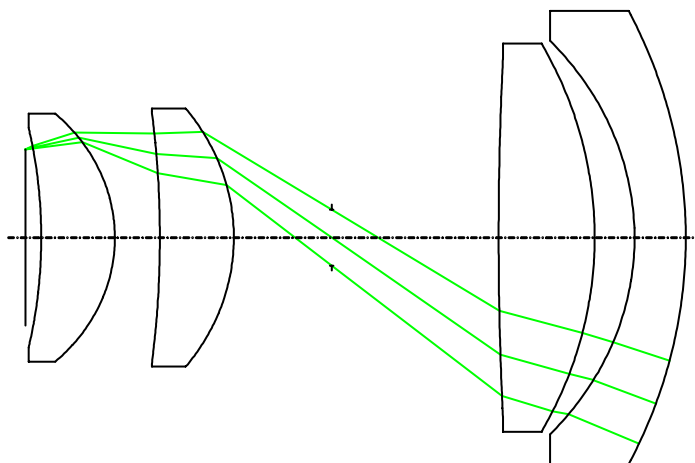


Рис. 4

Проверим, как повлияет введение асферических поверхностей на качество системы. При введении поверхностей 2...6-го порядков улучшения качества не наблюдается. При введении поверхностей более высокого порядка при тех же размерах пятен рассеяния отклонение диаметра от номинального значения составляет менее 1 мкм. Введение в 4-линзовую систему асферических поверхностей 10-го порядка позволяет достичь качества, соответствующего 5-линзовому объективу. Это не противоречит условию задачи, но может создать определенные трудности при производстве.

Учитывая качество формируемого изображения и технологичность изготовления, принято решение использовать 5-линзовый объектив без асферических поверхностей. Апертурная диафрагма диаметром 1,51 мм располагается на расстоянии 4,17 мм после 4-й поверхности. Величина переднего отрезка для длин волн 480, 546, 587 и 643 нм равна соответственно 0,569, 0,716, 0,785 и 0,86 мм. Задний отрезок в первой конфигурации равен 1000 мм, в остальных

меняется для сохранения постоянного расстояния между плоскостью предмета и изображения. Конструктивные параметры 5-линзового объектива приведены в таблице.

Номер поверхности	Радиус поверхности, мм	Расстояние между поверхностями по оси, мм	Световой диаметр, мм
1	-43,57		10,48
		3,51	
2	-9,76		11,74
		2,57	
3	-269,70		11,62
		4,05	
4	-12,48		11,64
		10,15	
5	78,26		14,14
		2,79	
6	-27,20		14,98
		2,3	
7	-13,45		15,52
		2,39	
8	-154,71		19,97
		1,45	
9	-48,64		21,45
		4,41	
10	-19,34		23,46

Следует отметить, что поскольку коэффициент корреляции зависимостей $s(\lambda)$ и $n(\lambda^{-1})$ составляет 0,9999 (что согласуется с теорией [6]), то определять положения плоскости наилучшей установки предмета для других длин волн можно теоретически, без повторной оптимизации системы. При проектировании систем с пространственным разделением изображения по длинам волн рекомендуется отказаться от жесткого задания дистанции фокусировки для получения более высокого качества изображения.

Автор выражает благодарность организаторам и участникам международного семинара по оптическому проектированию "IODS'10", а также А. Н. Юдину за ценные консультации в процессе создания системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный web-сайт международного семинара "IODS'10" [Электронный ресурс]: < <http://iods.pro/> >.
2. Glass catalog: Официальный web-сайт "Ohara Corporation" [Электронный ресурс]: < <http://www.oharacorp.com/catalog.html> >.
3. Glass catalog: Официальный web-сайт "Schott Corporation" [Электронный ресурс]: < http://www.schott.com/advanced_optics/english/our_products/materials/optical_glass.html >.
4. Zemax. Optical Design Program. User's Guide. 2008. Nov. 10. 756 p.
5. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979. 448 с.
6. Закаэнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. Н. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.

Сведения об авторе

Андрей Виталиевич Правдивцев — Научно-исследовательская группа „Конструктивная кибернетика“, Москва; ведущий специалист; E-mail: apravd@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов научных исследований
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Поступила в редакцию
07.06.11 г.