

УДК 535.317

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-594-601

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА АТЕРМАЛИЗОВАННОГО СКЛЕЕННОГО КОМПОНЕНТА

Т.В. Иванова, Г.Э. Романова, Т.И. Жукова, О.С. Калинин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: oskalinkina@corp.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 25.04.19, принята к печати 29.05.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Иванова Т.В., Романова Г.Э., Жукова Т.И., Калинин О.С. Автоматизация синтеза атермализованного склеенного компонента // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 594–601. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-594-601

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены вопросы автоматизации синтеза и анализа склеенного компонента с учетом возможностей ахроматизации и одновременной пассивной атермализации. Представлен алгоритм такой автоматизации и приведен пример разработки склеенного компонента с использованием этого алгоритма. **Методы.** Синтез компонента с учетом ахроматизации заключается в подборе пары стекол и вычислении радиусов кривизны для системы двух бесконечно тонких склеенных линз, обладающей заданными значениями трех параметров, определяющих сферическую aberrацию третьего порядка P , кому третьего порядка W и хроматическую aberrацию C по методике Слюсарева. Пассивная атермализация осуществляется при помощи метода номограмм. В отличие от традиционного визуального подбора пары стекол производится вычисление величины, позволяющей оценить термооптические свойства системы и вывод ее в сводную таблицу. **Основные результаты.** Разработанный алгоритм позволяет распространить модульный принцип проектирования, который обычно применяется для aberrационных расчетов, также и на расчет терморасфокусировки, так как в процессе автоматизированного расчета оценивается и то, и другое. Приведен пример, демонстрирующий достижения величины расфокусировки меньше дифракционной глубины резкости. **Практическая значимость.** Разработанный алгоритм позволяет упростить и ускорить для проектировщика этап подбора материалов при предварительном расчете склеенного из двух линз компонента, оценить баланс aberrаций в целом, поведение рассчитанного компонента при изменениях температуры, а также выполнить сравнительный анализ нескольких близких вариантов системы.

Ключевые слова

склеенный компонент, синтез, атермализация, ахроматизация, aberrации третьего порядка

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-594-601

AUTOMATION OF ATHERMAL CEMENTED DOUBLET SYNTHESIS

T.V. Ivanova, G.E. Romanova, T.I. Zhukova, O.S. Kalinkina

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: oskalinkina@corp.ifmo.ru

Article info

Received 25.04.19, accepted 29.05.19
 Article in Russian

For citation: Ivanova T.V., Romanova G.E., Zhukova T.I., Kalinkina O.S. Automation of athermal cemented doublet synthesis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 594–601 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-594-601

Abstract

Subject of Research. The paper considers the problems of synthesis and analysis automation for the cemented doublet with the possibilities of achromatization and synchronous passive athermalization. We present an algorithm for such automation and give an example of the cemented doublet development using this algorithm. **Methods.** Component synthesis with regard to achromatization consists in selection of a pair of glasses and calculation of the curvature radii for a system of two infinitely thin cemented lenses with given values of three parameters determining the spherical aberration of the third order (P), the third order coma (W) and chromatic aberration (C) according to Slusarev procedure. Passive athermalization is performed using the method of nomograms. In contrast to the traditional visual selection of a pair of glasses, a value is calculated for evaluation of the system thermo-optical properties and the result is displayed in the summary table. **Main Results.** The developed algorithm gives the possibility to extend the modular design principle most commonly used for aberrational calculations to the calculation of thermal

defocusing. An example of algorithm application is given demonstrating defocusing value less than diffraction focus depth. **Practical Relevance.** The developed method simplifies and speeds up the stage of materials selection for the designer or engineer during the preprocessing calculation of the cemented doublet from two lenses; evaluates the balance of aberrations in general and the calculated component behavior with temperature changes; performs comparative analysis of several similar system variants.

Keywords

cemented doublet, synthesis, athermalization, achromatization, third order aberration

Введение

Во многих случаях удобно использовать метод композиции, модульный метод проектирования и аналогичные подходы, когда сложная многокомпонентная схема разбивается на составные части, при этом каждая часть может быть синтезирована с учетом абберационных свойств, необходимых для данного положения внутри схемы, а абберационные свойства всей системы, таким образом, являются вполне предсказуемыми.

Традиционно склеенная из двух линз система является базовым компонентом для проектирования оптических систем различного назначения. Ее абберационные свойства достаточно хорошо изучены, однако при необходимости одновременного достижения заданных значений трех аббераций (сферической абберации, комы и хроматизма положения) синтез такого относительно простого компонента представляет некоторые трудности [1–3]. Этот этап может быть упрощен за счет использования возможностей автоматизации [4–7].

В современных условиях при проектировании приборов, работающих в широком диапазоне температур, необходимо обеспечить стабильность абберационной коррекции для всего диапазона. Одним из способов сохранения коррекции является атермализация (как пассивная, так и активная). Для оценки возможностей атермализации необходимо на стадии синтеза компонента как минимум предусмотреть оценку терморасфокусировки, а как максимум – учесть термооптические свойства при синтезе компонентов.

Если рассматривать склеенную из двух линз систему, то добавление еще одного условия — атермализации — дополнительно усложняет синтез компонента. В работе рассматриваются возможности разработки инструмента, позволяющего автоматизировать и ускорить процесс оценки термооптических свойств синтезируемого компонента.

Расчет склеенного компонента по основным параметрам

Расчет двухлинзового склеенного объектива по методике Слюсарева [8, 9] представляет собой определение пары стекол и вычисление радиусов кривизны для системы двух бесконечно тонких склеенных линз, обладающей заданными значениями трех параметров:

- P — параметр, определяющий сферическую абберацию третьего порядка;
- W — параметр, определяющий кому третьего порядка;
- C — параметр, определяющий хроматическую абберацию.

Эти три величины, комбинированные различным образом, определяют все хроматические абберации в гауссовой области и все абберации третьего порядка. В данной работе предлагается также при подборе стекол учитывать рабочую температуру, что позволит добиться не только ахроматизации, но и атермализации. Согласно методике Слюсарева [8], происходит выбор по таблице нескольких комбинаций стекол, для которых параметры P и C имеют близкие к требуемым значения. Затем для найденных пар стекол вычисляются конструктивные параметры исходного варианта объектива.

Одна из проблем, связанных с «табличным» подходом, — это его статичность, а именно невозможность изменения доступного набора стекол и/или их характеристик. Другая проблема связана с точностью значений, содержащихся в таблицах. С.В. Трубка проделал огромную работу по составлению таблиц [9], но округление показателей преломления и коэффициентов дисперсий до начала расчета и привязка к ГОСТ 3514-76¹ существенно ограничивает возможности их использования. В частности, при необходимости ахроматизации в другом спектральном диапазоне использование этих таблиц напрямую, без дополнительного пересчета, невозможно.

Для того чтобы отказаться от статичного подхода в виде таблиц, для вычисления всех требуемых параметров необходим параметр хроматизма C и дисперсионные характеристики стекла (показатель преломления и число Аббе), которые можно получить из каталогов оптических стекол.

В качестве источника исходных данных для реализации алгоритма модифицированной методики Слюсарева выбраны каталоги оптических материалов в формате, принятом в программе ZEMAX [10], как наиболее распространенной среде проектирования оптических систем, включающей большое число каталогов стекла различных производителей. Выбор источника сведений о материале во многом зависит

¹ ГОСТ 3514-76. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. Введ. 01.01.1980. М.: Издательство стандартов, 1980.

от его информативности и удобства, а каталоги программы ZEMAX обновляемы, универсальны, их формат позволяет создавать новые каталоги стекол самостоятельно, а не только использовать готовые.

Атермализация клеенного компонента

Для учета влияния температуры на показатель преломления стекла используется термодисперсионная формула, представляющая собой «поправку» на температуру, т. е. изменение показателя преломления при температуре, отличающейся от справочной для данного стекла (обычно это 20 °С). Изменение абсолютного показателя преломления стекла от температуры выражается следующим образом:

$$\Delta n_{abs} = \frac{n^2 - 1}{2n} \left[D_0 \Delta T + D_1 \Delta T^2 + D_2 \Delta T^3 + \frac{E_0 \Delta T + E_1 \Delta T^2}{\lambda^2 - S_{ik} \lambda_{ik}^2} \right],$$

где n — относительный показатель преломления для заданного справочного значения температуры; ΔT — изменение температуры относительного справочного значения; $D_0, D_1, D_2, E_0, E_1, \lambda_{ik}$ — константы, предоставляемые производителем стекла, которые описывают его «термальное» поведение; S_{ik} — вспомогательная константа (равняется «1», если λ_{ik} положительное, и «-1», если отрицательное).

Для расчета всей системы необходимо также учитывать воздушные промежутки, например, в пространстве изображений за клеенным компонентом.

Для показателя преломления воздуха (1)–(2):

$$n_{air} = 1 + \frac{(n_{ref} - 1)P}{1 + (T - 15)(3,4785 \cdot 10^{-3})}, \quad (1)$$

где

$$n_{ref} = 1 + \left[6432,8 + \frac{2949810\lambda^2}{146\lambda^2 - 1} + \frac{25540\lambda^2}{41\lambda^2 - 1} \right] \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

где T — температура в градусах Цельсия; P — относительное давление воздуха, безразмерное; λ — длина волны в микрометрах.

Для пассивной атермализации необходимо не просто вычислять показатель преломления стекла с учетом температуры, но и подбирать пару стекол в компоненте таким образом, чтобы при изменении температуры влияние изменения геометрических параметров линз (радиусов кривизны и толщин) и изменения показателей преломления компенсировали друг друга.

Для подбора атермализованной пары стекол [11] традиционно используются так называемые номограммы оптических стекол, позволяющие исследовать поведение оптических материалов под воздействием температур [12–15].

Все известные номограммы используют в разных сочетаниях графики зависимостей коэффициента дисперсии ν (3) и термооптического коэффициента V (4):

$$\nu = \frac{n_0 - 1}{n_{\min} - n_{\max}}, \quad (3)$$

$$V = \frac{\frac{\delta n}{\delta T}}{n_0 - 1} - \alpha, \quad (4)$$

где $\frac{\delta n}{\delta T}$ — производная относительного показателя преломления по отношению к температуре, измеренной на центральной длине волны и исходной температуре стекла; α — температурный коэффициент линейного расширения стекла.

Рассмотрим некоторые примеры номограмм:

— номограмма К. Шверц [13] представляет собой зависимость $V(\nu)$ термооптического коэффициента V от коэффициента дисперсии ν ;

— номограмма Д.С. Волосова [12] представляет собой зависимость $V \cdot \nu(\nu)$ произведения коэффициента дисперсии на термооптический коэффициент $V \cdot \nu$ от коэффициента дисперсии ν ;

— номограмма Я. Тамагавы [16], реализованная в популярной программе ZEMAX OpticStudio в виде атермальной карты стекол представляет собой зависимость $V(1/\nu)$ термооптического коэффициента V от обратного коэффициента дисперсии $1/\nu$.

При использовании номограммы Тамагавы (атермальной карты ZEMAX OpticStudio) для подбора материалов, удовлетворяющих условию ахроматизации и атермализации, необходимо найти два оптических стекла, лежащих на одной линии, проходящей через начало координат. Данная номограмма представляет

собой простой и наглядный способ подбора стекол, но не учитывает температурное расширение элементов конструкции системы [11].

В этом случае два стекла двухлинзового склеенного компонента будут удовлетворять условию (5):

$$\begin{cases} \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \\ \Delta\Phi = \varphi_1\Phi_1 + \varphi_2\Phi_2, \\ \frac{d\Phi}{dT} = \psi_1\Phi_1 + \psi_2\Phi_2 \end{cases} \quad (5)$$

где Φ_1 и Φ_2 — соответствующие оптические силы первой и второй линзы, φ_1 и φ_2 — соответствующие хроматические силы (обратный коэффициент Аббе) первой и второй линзы, ψ_1 и ψ_2 — соответствующие термические силы первой и второй линзы.

В номограмме Волосова и Шверц для материалов, удовлетворяющих условию ахроматизации и атермализации, необходимо провести прямую, наклон которой определяется коэффициентом теплового расширения материала корпуса, и на ней найти два оптических стекла. К недостаткам всех номограмм можно отнести то, что подбор материала выполняется графо-аналитическим способом, а после подбора на карте или графике материалов необходимо оценить результаты численно для выбора наиболее оптимального варианта. В данной работе рассматривается возможность автоматизации расчета и анализа термооптических свойств склеенного из двух линз компонента.

Алгоритм вычисления параметров склеенного компонента с учетом ахроматизации и атермализации

Как уже говорилось выше, основные данные об оптических стеклах берутся из каталогов стекол программы ZEMAX OpticStudio. Методика Слюсарева основана на разбиении всех стекол на «кроны» и «флинты» и дальнейшем составлении пар в комбинации «крон впереди» либо «флинт впереди». В предлагаемом алгоритме перебираются все стекла каталога, при этом за «крон» берется стекло с большим числом Аббе, а за «флинт» соответственно с меньшим. С.В. Трубка показал, что комбинация «флинт впереди» получается простым оборачиванием компонента с комбинацией стекол «крон впереди», из чего следует, что при расчете можно воспользоваться теми же формулами [9].

Модифицированный алгоритм выглядит следующим образом.

1. Выбор пользователем файла с каталогом стекол в формате ZEMAX OpticStudio (*.agf).
2. Задание пользователем требуемых параметров P , W , C , параметров атермализации (температура и давление), основных характеристик компонента (диаметр входного зрачка, фокусное расстояние, основную и дополнительную длины волн), и требуемого количества пар стекол для анализа.
3. Построение номограмм.
4. Перебор «каждого с каждым» всех стекол и для каждой пары стекол вычисление табличных значений (с учетом температуры) для двух комбинаций, «крон впереди» и «флинт впереди»:
 - оптическая сила Φ_1 и параметр кривизны τ ;
 - минимальное значение инварианта Аббе на поверхности склейки Q_{01} и Q_{02} ;
 - минимальное значение основного параметра комы W_{01} и W_{02} ;
 - минимальное значение основного параметра P_{01} и P_{02} .
5. Выбор пользователем нескольких комбинаций стекол, для которых параметры P_0 и C имеют наиболее близкие к требуемым значения.
6. Для найденных пар стекол производится расчет следующих параметров:
 - конструктивные параметры склеенного объектива;
 - итоговые параметры P , W , C ;
 - аберрации третьего порядка и аберрации на основе расчета реального луча (поперечная и продольная сферическая аберрация для края зрачка, хроматизм положения и кома для заданной точки поля); коэффициент теплового расширения материала корпуса.

Вычисленные параметры выводятся в итоговую таблицу, а пара стекол отображается на номограммах. Проанализировав представленные данные, пользователь может выбрать именно тот склеенный компонент, который наиболее соответствует заданным параметрам P , W , C и требуемому коэффициенту теплового расширения материала корпуса (КТЛР). Выбранная пара стекол может являться базой для продолжения анализа и оптимизации в сторонних программах для автоматизированного проектирования оптических систем, в частности в программе имеется возможность сохранения выбранного результата в формат формата ZEMAX OpticStudio, для других программ рекомендуется использовать существующие конверторы [17] из этого формата или ручной ввод данных.

Пример расчета склеенного компонента по разработанной методике

Рассмотрим пример расчета системы с использованием разработанного алгоритма.

В качестве примера рассчитаем компонент с фокусным расстоянием $f' = 50$ мм, $D = 15$, ахроматизованный в диапазоне $F' - C'$, основная длина волны e . После этапа поиска сочетаний стекол, обеспечивающих $P = W = C = 0$, в таблице результатов можно видеть несколько возможных сочетаний. В зависимости от задачи более важным может являться коррекция остаточной сферической aberrации, комы, сферохроматизма. Дополнительный параметр позволяет оценить свойства материала корпуса — прокладного кольца в воздушном промежутке, который позволит сделать такой компонент атермализованным.

В табл. 1 приведены результаты вычислений для каталога стекол Шотт. Как видно из таблицы, для придания системе, склеенной из двух линз, атермальных свойств, необходимо выбрать комбинацию, обеспечивающую КТЛР близким к значению используемого конструкционного материала. Таких комбинаций в таблице несколько:

- N-SK16/N-KZFS11 (КТЛР = $12,6 \cdot 10^{-6} 1/K$ — близко к значению КТЛР стали);
- SF5/N-BAK2 (КТЛР = $11,4 \cdot 10^{-6} 1/K$);
- LAFN7/N-LAK21 (КТЛР = $19,54 \cdot 10^{-6} 1/K$ — близко к КТЛР алюминия);
- N-BAF10/SF4 (КТЛР = $7,5 \cdot 10^{-6} 1/K$ — близко к значению для титана).

Однако комбинация N-SK16/N-KZFS11 обладает большими значениями сферической aberrации (относительно большие значения оптических сил), из-за чего может быть полезной только при работе с небольшими относительными отверстиями. В нашем случае ее применение нерационально. Комбинации N-BAF10/SF4 лучше подходит для большего относительного отверстия. Для этой комбинации смещение плоскости фокуса в диапазоне температур -40 до $+60$ °С составляет 16 мкм (при использовании титана в качестве материала корпуса), что близко к дифракционной глубине резкости.

Таблица 1. Результаты расчета для каталога материалов Шотт

Стекло № 1	Стекло № 2	Оптическая сила первой линзы	Оптическая сила второй линзы	Продольная aberrация, мм	Продольная aberrация третьего порядка, мм	Продольная aberrация пятого порядка, мм	Хроматизм положения, мм	КТЛР $10^{-6} 1/K$
N-BAF10	SF4	2,41	-1,41	0,130331	-0,027935	0,158266	-0,009865	7,505
N-BALF4	SF4	2,04	-1,04	0,156945	-0,027892	0,184837	-0,007132	2,809
N-K5	P-SF69	1,96	-0,96	0,220932	-0,031922	0,252854	-0,007581	3,942
N-SK11	F5	2,66	-1,66	0,374752	-0,072803	0,447555	-0,007264	5,846
N-SK16	N-KZFS11	3,36	-2,36	4,224267	-2,637407	6,861674	-0,010887	12,646
N-BK10	N-SF2	2,01	-1,01	1,208663	-0,274553	1,483217	-0,005037	2,437
N-BALF5	N-SF14	1,97	-0,97	0,771858	-0,123612	0,895469	-0,008925	-0,767
N-BK10	SF2	2,01	-1,01	1,236608	-0,266058	1,502667	-0,005063	1,773
N-SF2	N-BAK1	-1,42	2,42	1,663379	-0,725081	2,388461	-0,040249	8,459
N-LAF7	N-LAK9	-1,73	2,73	1,042869	-0,413714	1,456583	-0,033099	3,237
SF1	N-BALF4	-1,21	2,21	1,040019	-0,457749	1,497768	-0,064314	2,008
SF5	N-BAK2	-1,16	2,16	1,387541	-0,622314	2,009856	-0,059676	11,392
SF2	N-BAK1	-1,42	2,42	0,333245	-0,113765	0,447009	-0,040270	7,540
N-SF5	N-BAK2	-1,17	2,17	0,274518	-0,131850	0,406368	-0,059713	7,403
LAFN7	N-LAK21	-1,38	2,38	0,203093	-0,069222	0,272315	-0,045641	19,541
N-SF1	N-BALF4	-1,21	2,21	0,231257	-0,097444	0,328700	-0,064437	-8,028

Выполнив аналогичные расчеты для каталога материалов Лыткаринского завода оптического стекла (ЛЗОС), можно получить другие комбинации. Например, вариант комбинации ТФ1/ЛК7 имеет отрицательную величину КТЛР, необходимого для атермализации материала, при использовании алюминиевого прокладного кольца смещение плоскости фокусировки при изменении температуры составит 127 мкм. Система Ф1/ЛК3 с КТЛР = $22,34 \cdot 10^{-6} 1/K$ — позволяет предположить, что при работе с алюминием терморасфокусировка системы будет достаточно мала. Действительно, расчет такой системы и оценка терморасфокусировки при работе в диапазоне температур -40 до $+60$ °С дает остаточную терморасфокусировку 9 мкм, что несколько меньше дифракционной глубины резкости.

На рис. 1 и 2 приведена оптическая схема полученной системы и ее сферической aberrации для основной длины волны при разных температурах. Из графика (рис. 2) видно, что при разных температурах

баланс aberrаций сохраняется. В табл. 2 указан размер пятна рассеяния (с учетом трех длин волн). Из таблицы видно, что при изменении температуры размер пятен рассеяния практически не меняется.

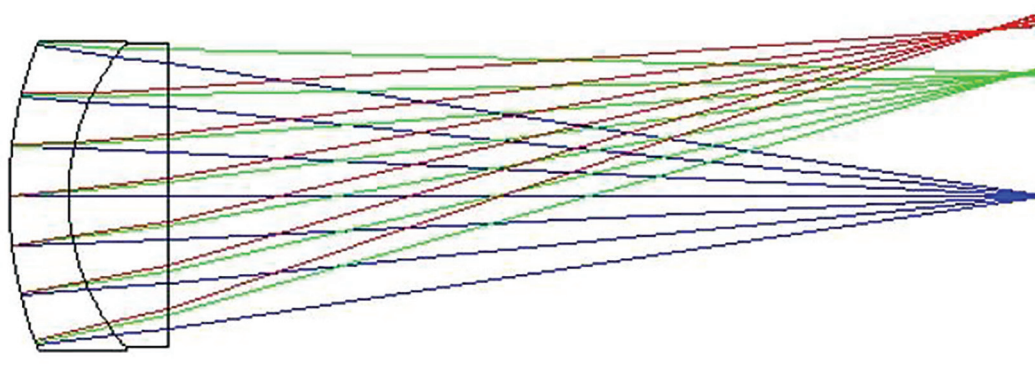


Рис. 1. Рассчитанный пример системы из комбинации стекол Ф1 – ЛК3

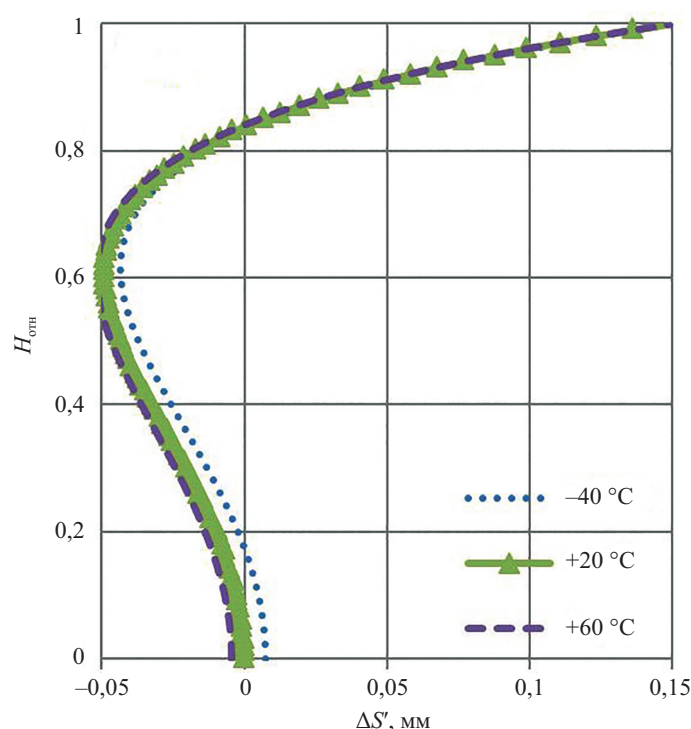


Рис. 2. График продольной сферической aberrации для основной длины волны при температуре -40 , $+20$ (номинал), $+60$ °C

Таблица 2. Размеры пятна рассеяния для точки на оси с учетом трех длин волн при разных температурах (материал заднего отрезка — алюминий)

Температура, °C	-40	+10	+20	+60
Средний квадратический радиус пятна рассеяния, мкм	9,497	9,437	9,437	9,449
Геометрический радиус пятна рассеяния, мкм	31,268	31,332	31,375	31,589

Заключение

Использование разработанной на основе описанного алгоритма программы позволяет упростить этап подбора материалов при предварительном расчете оптической системы (склеенного компонента), выбор которых существенно влияет на коррекцию хроматических aberrаций и баланс aberrаций в целом, и обеспечить стабильность aberrационной коррекции в широком диапазоне температур или оценить предполагаемую терморасфокусировку. Программа находится в открытом доступе на сайте <http://aco.ifmo.ru/developed.html>.

Литература

1. Иванов С.Е., Романова Г.Э. Расчет термостабилизированных ахроматизованных инфракрасных объективов с использованием графо-аналитического метода подбора материалов // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 3. С. 256–262. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-256-262
2. Иванов С.Е., Романова Г.Э. Использование двухкомпонентного афокального компенсатора в зеркально-линзовых системах для коррекции термоабберации положения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 372–379. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-372-379
3. Ivanov S.E., Romanova G.E., Bakholdin A.V. Using a two-lens afocal compensator for thermal defocus correction of catadioptric system // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10375. P. 1037512. doi: 10.1117/12.2273629
4. Romanova G., Ivanova T., Korotkova N. Automation design of cemented doublet // Proceedings of SPIE. 2015. V. 9626. P. 96262S. doi: 10.1117/12.2191115
5. Иванова Т.В., Романова Г.Э., Бондаренко Д.В., Калинин О.С., Короткова Н.Д. Синтез клеенного компонента // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614896. 2016.
6. Ivanova T.V., Romanova G.E., Zhukova T.I., Kalinkina O.S. Method for calculation and analysis of a cemented component with a chromatic and aplanatic correction // Journal of Optical Technology. 2017. V. 84. N 8. P. 548–551. doi: 10.1364/jot.84.000548
7. Ivanova T., Romanova G., Zhukova T., Kalinkina O. Computer tool for achromatic and aplanatic cemented doublet design and analysis // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10376. P. 103760X. doi: 10.1117/12.2274156
8. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
9. Трубка С.В. Расчет двухлинзовых клеенных объективов. Справочник. Л.: Машиностроение, 1984. 141 с.
10. Zemax Optic Studio 18.9. User's Manual. Radiant Zemax LLC, 2019. 2557 p.
11. Иванов С.Е., Романова Г.Э. Метод выбора оптических материалов для создания апохроматических атермализованных оптических систем // Оптический журнал. 2016. № 12. С. 25–30.
12. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. Теория, основы проектирования, оптические характеристики. М.: Искусство, 1978. 543 с.
13. Schwertz K., Dillon D., Sparrold S.W. Graphically selecting optical components and housing material for color correction and passive athermalization // Proc. of SPIE. 2010. V. 8486. 18 p. doi: 10.1117/12.930968
14. Shchavalev O.S., Arhipova L.N. Athermal optical glasses and thermally stable space-based apochromats // Journal of Optical Technology. 2003. V. 70. N 8. P. 576–585. doi: 10.1364/jot.70.000576
15. Tamagava Y. Multilens system design with an athermal chart // Applied Optics. 1994. V. 33. P. 8009–8013. doi: 10.1364/ao.33.008009
16. Tamagava Y., Wakabayashi S., Tajime T. New design method for athermalized optical systems // Proc. SPIE. 1992. V. 1752. P. 232–238. doi: 10.1117/12.130734
17. Ivanova T.V., Zhukova T.I. Conversion of optical system parameters in various software products // Journal of Optical Technology. V. 84. N 1. P. 12–15. doi: 10.1364/jot.84.000012

Авторы

Иванова Татьяна Владимировна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7202117384, ORCID ID: 0000-0001-8564-243X, tvivanova@corp.ifmo.ru

Романова Галина Эдуардовна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 8215289000, ORCID ID: 0000-0001-9348-8540, geromanova@corp.ifmo.ru

References

1. Ivanov S.E., Romanova G.E. Calculation of heat-stabilized achromatic IR-lenses using a graphic method for choice of optical materials. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 256–262 (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-256-262
2. Ivanov S.E., Romanova G.E. Two-lens afocal compensator for thermal defocus correction of catadioptric system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 372–379 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-372-379
3. Ivanov S.E., Romanova G.E., Bakholdin A.V. Using a two-lens afocal compensator for thermal defocus correction of catadioptric system. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10375, p. 1037512. doi: 10.1117/12.2273629
4. Romanova G., Ivanova T., Korotkova N. Automation design of cemented doublet. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9626, pp. 96262S. doi: 10.1117/12.2191115
5. Ivanova T.V., Romanova G.E., Bondarenko D.V., Kalinkina O.S., Korotkova N.D. Synthesis of Glued Component. *Certificate of computer programs registration*, no. 2016614896, 2016.
6. Ivanova T.V., Romanova G.E., Zhukova T.I., Kalinkina O.S. Method for calculation and analysis of a cemented component with a chromatic and aplanatic correction. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 8, pp. 548–551. doi: 10.1364/jot.84.000548
7. Ivanova T., Romanova G., Zhukova T., Kalinkina O. Computer tool for achromatic and aplanatic cemented doublet design and analysis. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10376, p. 103760X. doi: 10.1117/12.2274156
8. Slyusarev G.G. *Calculation of Optical Systems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1975, 640 p. (in Russian)
9. Trubko S.V. *Calculation of Two-Lens Glued Lenses. Reference Book*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1984, 141 p. (in Russian)
10. *Zemax Optic Studio 18.9. User's Manual*. Radiant Zemax LLC, 2019, 2557 p.
11. Ivanov S.E., Romanova G.E. Optical material selection method for an apochromatic athermalized optical system. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 12, pp. 729–733. doi: 10.1364/JOT.83.000729
12. Volosov D.S. *Photographic Optics. Theory, Principles of Design, Optical Characteristics*. Moscow, Iskusstvo Publ., 1978, 543 p. (in Russian)
13. Schwertz K., Dillon D., Sparrold S.W. Graphically selecting optical components and housing material for color correction and passive athermalization. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 8486, 18 p. doi: 10.1117/12.930968
14. Shchavalev O.S., Arhipova L.N. Athermal optical glasses and thermally stable space-based apochromats. *Journal of Optical Technology*, 2003, vol. 70, no. 8, pp. 576–585. doi: 10.1364/jot.70.000576
15. Tamagava Y. Multilens system design with an athermal chart. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, pp. 8009–8013. doi: 10.1364/ao.33.008009
16. Tamagava Y., Wakabayashi S., Tajime T. New design method for athermalized optical systems. *Proc. SPIE*, 1992, vol. 1752, pp. 232–238. doi: 10.1117/12.130734
17. Ivanova T.V., Zhukova T.I. Conversion of optical system parameters in various software products. *Journal of Optical Technology*, vol. 84, no. 1, pp. 12–15. doi: 10.1364/jot.84.000012

Authors

Tatyana V. Ivanova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7202117384, ORCID ID: 0000-0001-8564-243X, tvivanova@corp.ifmo.ru

Galina E. Romanova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 8215289000, ORCID ID: 0000-0001-9348-8540, geromanova@corp.ifmo.ru

Жукова Татьяна Ивановна — ведущий программист, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56034363200, ORCID ID: 0000-0002-4991-2559, ti-matus@yandex.ru

Калинкина Ольга Сергеевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-2522-8496, oskalinkina@corp.ifmo.ru

Tatyana I. Zhukova — Leading software developer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56034363200, ORCID ID: 0000-0002-4991-2559, ti-matus@yandex.ru

Olga S. Kalinkina — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-2522-8496, oskalinkina@corp.ifmo.ru