

ТРЕХЛИНЗОВЫЙ ШЕСТИЦВЕТНЫЙ СУПЕРАХРОМАТ
ШИРОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

З. Х. НГУЕН*, А. В. БАХОЛДИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
*184365@niuitmo.ru

Аннотация. Исследованы оптические системы шестицветных суперахроматов, обладающих исправленным хроматизмом положения в широком спектральном диапазоне. Разработана программа автоматического синтеза трехлинзовых объективов с исправленным хроматизмом положения в широком спектральном диапазоне. Синтез апохроматов выполнен на основе теории абберации третьего порядка. Применен метод полного перебора рассчитанных вариантов объективов из заданного пользователем каталога материалов. Разработана двухступенчатая система ранжирования рассчитанных объективов, учитывающая качество изображения осевой точки и чувствительность объектива к погрешности изготовления. Найдены решения для трехлинзовых шестицветных суперахроматов в спектральном диапазоне 365—1000 нм. Приведены конструктивные параметры нескольких интересных вариантов. Представленные апохроматы и суперахроматы могут служить объективами телескопических систем или коллиматоров.

Ключевые слова: синтез оптических систем, трехлинзовый объектив, суперахромат, апохромат, вторичный спектр

Ссылка для цитирования: Нгуен З. Х., Бахолдин А. В. Трехлинзовый шестицветный суперахромат широкого спектрального диапазона // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 464—471. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-464-471.

THREE-LENS SIX-COLOR SUPERACHROMAT OF A WIDE SPECTRAL RANGE

D. H. Nguyen*, A. B. Bakholdin

ITMO University, St. Petersburg, Russia
*184365@niuitmo.ru

Abstract. Optical systems of 6-color superachromats with corrected longitudinal chromatic aberration in a wide spectral range are studied. An algorithm for automatic synthesis of three-lens objective with corrected longitudinal chromatic aberration in a wide spectral range is developed. Synthesis of apochromats is performed on the basis of the third-order aberrations theory. The method of exhaustive search of calculated objectives from a user-specified catalog of materials is applied. A two-stage ranking system of calculated objectives, taking into account the axial point image quality and the sensitivity of the objective to manufacturing errors, is proposed. Solutions for three-lens 6-color superachromats in the spectral range 365–1000 nm are found. The design parameters of several options of practical interest are given. The presented apochromats and superachromats can be used as objectives of telescopic systems or collimators.

Keywords: optical system design, triplet, superachromat, apochromat, secondary spectrum

For citation: Nguyen D. H., Bakholdin A. B. Three-lens six-color superachromat of a wide spectral range. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 6. P. 464—471 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-464-471.

Введение. Для получения высококачественного изображения осевой точки в широком спектральном диапазоне широко применяются трехлинзовые апохроматы и суперахроматы, особенно в качестве длиннофокусных объективов телескопических систем [1—3] или объективов коллиматоров. Синтез этих апохроматов для видимой области спектра рассмотрен в работах [4—12]. В настоящей работе под суперахроматом понимается объектив, в котором исправлен хроматизм положения для четырех или более длин волн [4]. В статье [12] предложен алгоритм расчета четырехцветных суперахроматов. В работе [13] представлена методика поиска пятицветного суперахромата, основанная на использовании дисперсионной формулы Бучдала [14] и критерия, минимизирующего модуль разниц между фокусными расстояниями от любых двух из пяти заданных длин волн. Алгоритм расчета многоцветных (пять и более) суперахроматов для видимой и ближней ИК-областей спектра в открытой литературе авторами не найден. Интенсивное развитие микроэлектроники привело к появлению приемников широкого спектрального излучения от ультрафиолетового до близкого ИК-излучения [15]. Таким образом, актуальной является задача разработки шестицветного суперахромата для широкого спектрального диапазона. Целью настоящей статьи является разработка программы автоматического синтеза трехлинзовых объективов с исправленным хроматизмом положения в широком спектральном диапазоне.

Используются четыре типа трехлинзовых объективов (рис. 1): *а* — расклеенный, *б* — склейка с линзой, *в* — линза со склейкой, *г* — склеенный. В настоящей работе рассмотрены объективы с малыми значениями воздушных промежутков, размеры которых не превышают одной десятой фокусного расстояния.

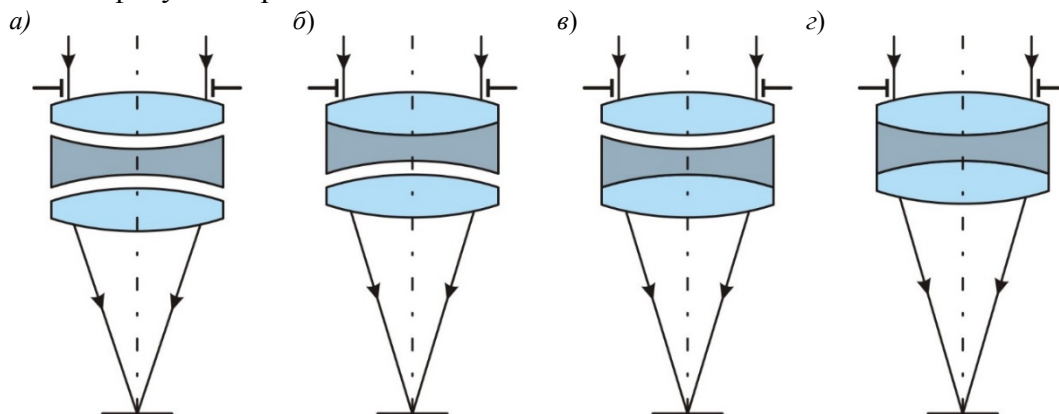


Рис. 1

Для синтеза оптических систем используются [16]: алгебраический метод [17], метод композиции [18] и метод проб. В настоящее время невозможно выполнить расчет пяти- и шестицветных суперахроматов алгебраическим (аналитическим) методом. Метод композиции широко применяется при синтезе уникальных оптических систем из элементов с известными характеристиками качества изображения. Этот метод сложно использовать для синтеза систем с широким спектральным диапазоном ввиду разнообразия дисперсионных свойств материалов, поэтому с его помощью невозможно синтезировать апохроматы. В настоящей работе использован метод проб и полного перебора всех возможных вариантов апохроматов „линза со склейкой“ для нахождения пяти- и шестицветных суперахроматов. Стоит отметить, что полный перебор характеризуется большим объемом вычислений.

Алгоритм синтеза. В настоящей работе алгоритм расчета трехлинзовых апохроматов базируется на известной методике Слюсарева, основанной на теории абберации третьего порядка [1, 2, 17].

Система ранжирования. Применяется оригинальная двухступенчатая система ранжирования. На первой ступени отбираются системы с уменьшенными абберациями высших порядков и малой чувствительностью объективов к погрешности изготовления оптических

элементов. На второй ступени отбираются системы с наилучшим качеством изображения осевой точки. На основе разработанного алгоритма создана программа автоматического синтеза трехлинзового апохромата „линза со склейкой“ и „склейка с линзой“ [19]. Данная программа также позволяет выполнять синтез трехлинзовых ахроматов [20].

Результат синтеза. При синтезе апохроматов использован Суммарный каталог, образованный путем объединения каталогов пяти ведущих производителей стекла: ЛЗОС, Schott, Ohara, CDGM и NHG в формате „*.agf“ программы OpticStudio/ZEMAX [21]. Входными данными для синтеза являются характеристики материала из Суммарного каталога (1106 марок стекол): рабочий спектральный диапазон 365—1000 нм; основная длина волны $\lambda_e = 546,07$ нм; фокусное расстояние $f' = 1000$ мм; диаметр входного зрачка (рассмотрен случай расположения апертурной диафрагмы на первой поверхности) $D = 100$ мм ($F\#10$); основные параметры, определяющие aberrации третьего порядка, — $P_0 = W_0 = C_0 = 0$; рассматривается только осевая точка, поэтому угловое поле системы моделируется для $2\omega = 0$.

С помощью разработанной программы проведен расчет трехлинзовых апохроматов типа „линза со склейкой“. В программе реализованы два режима синтеза: „Бесконечно тонкий объектив“ и „Объектив конечной толщины“. Из практики замечено, что при переходе от первого режима ко второму в подавляющем большинстве случаев хроматические aberrации заметно ухудшаются: уменьшается число перегибов на графике смещения фокуса и увеличивается максимальное хроматическое смещение фокуса (Maximum Chromatic Focal Shift, MCFS).

Коэффициент дисперсии является одной из основных характеристик при выборе оптических стекол. Материалы Суммарного каталога в спектральном интервале от $\lambda_{\min} = \lambda_{F'} = 479,99$ до $\lambda_{\max} = \lambda_{C'} = 643,85$ нм при основной длине волны $\lambda_e = 546,07$ нм имеют коэффициент дисперсии в диапазоне значений от 16 до 94. В расширенном спектральном интервале 365—1000 нм и на основной длине волны λ_e диапазон коэффициентов дисперсии этих же материалов изменяется от 4 до 27. На рис. 2 представлено окно программы с выведенным графиком зависимости частной относительной дисперсии γ от коэффициента дисперсии ν для материалов Суммарного каталога (в прямоугольной области выделены стекла с нормальным ходом дисперсии). Уменьшение диапазона коэффициентов дисперсии приводит к существенному сокращению удачных комбинаций материалов для коррекции вторичного спектра. Только использование особых стекол (например, FPL53, H-FK95N) или кристаллов (например, флюорита CaF_2) с особым ходом дисперсии позволяет исправить вторичный спектр в расширенном спектральном интервале [16, 22].

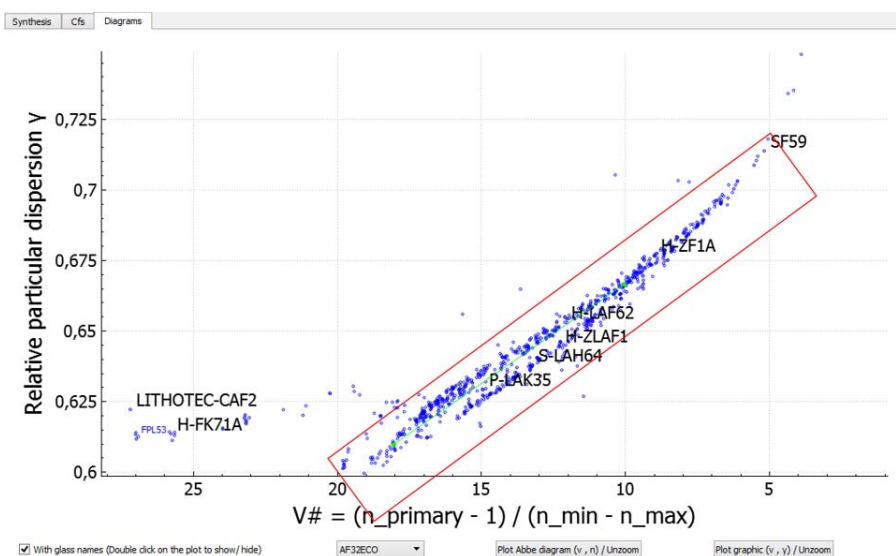


Рис. 2

С помощью разработанной программы проверены $1106^3 - 1106^2 = 1,35$ млрд возможных вариантов. В результате синтеза без оптимизации найдены шестицветные суперахроматы только в режиме „Бесконечно тонкий объектив“. Отсюда можно сделать вывод, что в спектральном интервале 365—1000 нм с использованием материалов Суммарного каталога семицветных суперахроматов не найдено. Среди рассчитанных вариантов самый маленький MCFS имеют шесть суперахроматов, состоящих из материалов FPL53, S-LAN64 и H-LAF62 (график смещения фокуса представлен на рис. 3, видно, что кривая хроматического смещения фокуса пересекает ось ординат в шести отдельных точках), их MCFS = 2,7 мкм, т.е. всего $f' / 370,000$.

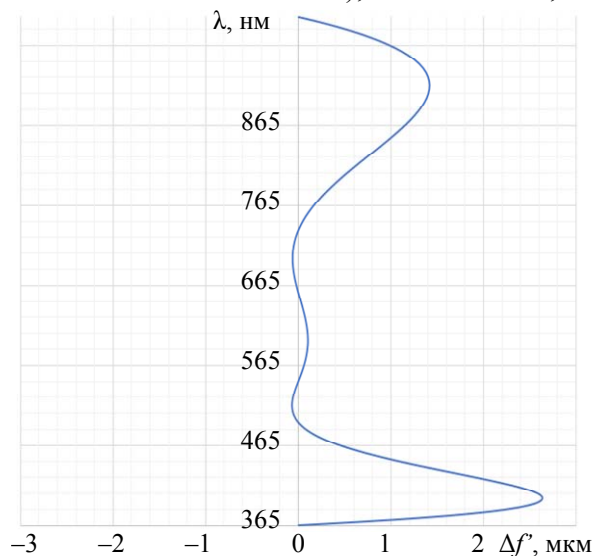


Рис. 3

Стоит отметить, что все шесть найденных суперахроматов имеют разные монохроматические абберрационные характеристики. Поэтому необходимо выбрать ту последовательность материалов, которая даст наилучшее качество изображения осевой точки. В данном случае наилучшей оказалась комбинация FPL53 ~ (S-LAN64 – H-LAF62). После перехода к системе с конечной толщиной линз и оптимизации в программе OpticStudio число перегибов на графике смещения фокуса уменьшается. Конструктивные параметры объектива и допуски на их изготовление представлены в табл. 1 (R — радиус кривизны поверхности, N — число колец интерференции, d — осевое расстояние, Δd — допуск на отклонение осевого расстояния, Δn_e — категория стекла в зависимости от показателя преломления, $\Delta(n_F' - n_C')$ — категория стекла в зависимости от отклонения средней дисперсии [23]). В табл. 1 представлены допуски на конструктивные параметры объектива при максимальном среднеквадратическом значении радиуса пятна рассеяния осевой точки 4,0 мкм для длины волны 632,8 нм, номинальное значение радиуса пятна в плоскости изображения составляет 2,96 мкм. На рис. 4 представлена зависимость поперечной сферической абберрации этого объектива в толщинах от относительной зрачковой координаты ρ_y . Наличие двух перетяжек подтверждает достижение ахроматизации в широком спектральном диапазоне.

Таблица 1

Конструктивные параметры суперахромата „линза со склейкой“

($f' = 1000$ мм, $D = 100$ мм, $2\omega = 0$, $P_0 = W_0 = C_0 = 0$, $St = 0,842$)

R , мм	N	d , мм	$\pm \Delta d$, мм	Марка материала	Категория Δn_e	Категория $\Delta(n_F' - n_C')$
529,14	49	10,0	$\pm 0,2$	FPL53	1	1
-309,29	10	1,0	$\pm 0,2$	AIR		
-327,08	6	10,0	$\pm 1,0$	S-LAN64	1	1
2350,15	532	10,0	$\pm 1,0$	H-LAF62	1	1
-606,98	11	993,9	$\pm 1,0$			

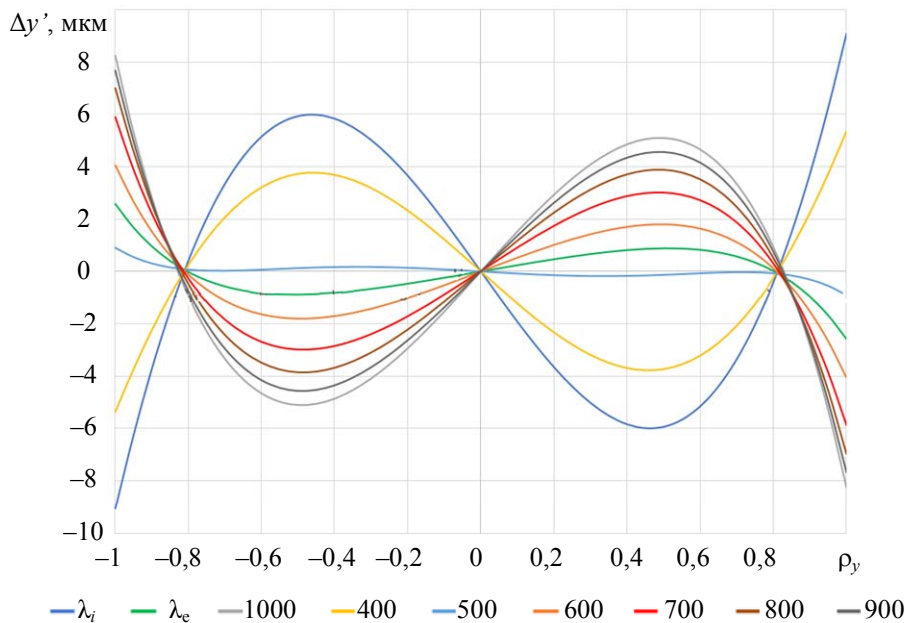


Рис. 4

Был обнаружен шестицветный суперахромат из комбинации материалов FPL53 ~ (H-ZF1A – SF59). После перехода в систему конечной толщины и оптимизации объектив еще остался шестицветным суперахроматом с MCFS ~ 48 мкм. В табл. 2 представлены конструктивные параметры объектива, допуски на изготовление конструктивных параметров объектива при максимальном среднеквадратическом значении радиуса пятна рассеяния осевой точки 28,7 мкм для длины волны 632,8 нм, номинальное значение радиуса пятна в плоскости изображения 27,7 мкм.

Таблица 2

Конструктивные параметры шестицветного суперахромата „линза со склейкой“ в толщинах
($f' = 1000$ мм, $D = 100$ мм, $2\omega = 0$, $P_0 = W_0 = C_0 = 0$, $St = 0,341$)

R , мм	N	d , мм	$\pm\Delta d$, мм	Марка материала	Категория Δn_e	Категория $\Delta(n_F - n_C)$
593,07	15	12,0	$\pm 0,07$	FPL53	1	1
-272,39	6	1,0	$\pm 0,07$	AIR		
-289,60	2	10,0	$\pm 1,0$	H-ZF1A	1	1
-5338,51	2	10,0	$\pm 1,0$	SF59	1	1
-1010,69	1	990,5	$\pm 1,0$			

График смещения фокуса этого суперахромата приведен на рис. 5, он пересекает ось ординат в шести различных точках.

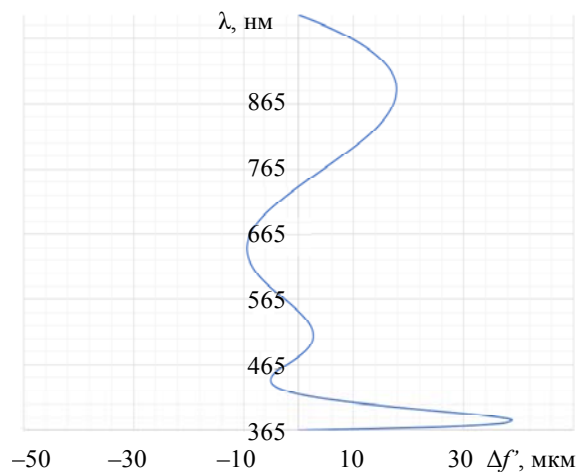


Рис. 5

Этот суперахромат не дает хорошего изображения осевой точки. При анализе результатов обнаружено, что не всегда увеличение числа перегибов на графике смещения фокуса приводит к уменьшению MCFS и наоборот. Таким образом, при синтезе апохромата в первую очередь необходимо уменьшить MCFS.

С помощью разработанной программы также были найдены апохроматы с хорошим исправлением сферохроматической aberrации. В табл. 3 представлены конструктивные параметры одного из них после оптимизации в программе OpticStudio.

Таблица 3

**Конструктивные параметры апохромата „линза со склейкой“
с исправлением сферохроматической aberrации**
($f' = 1000$ мм, $D = 100$ мм, $2\omega = 0$, $P_0 = W_0 = C_0 = 0$, $St = 0,948$)

R , мм	N	d , мм	$\pm \Delta d$, мм	Марка материала	Категория Δn_e	Категория $\Delta(n_F - n_C)$
674,92	31	12,0	$\pm 0,01$	H-FK71A	1	1
-181,77	1	1,0	$\pm 0,01$	AIR		
-184,59	1	10,0	$\pm 0,1$	H-ZLAF1	1	2
-139,96	5	10,0	$\pm 1,0$	P-LAK35	1	1
-509,68	5	1000,2	$\pm 1,0$			

В табл. 3 также представлены допуски на изготовление конструктивных параметров объектива при максимальном среднеквадратическом значении радиуса пятна рассеяния осевой точки 4 мкм для длины волны 632,8 нм, номинальное значение радиуса пятна в плоскости изображения 3,1 мкм. Сравнение допусков в табл. 1—3 показывает, что суперахромат FPL53 ~ (S-LAN64-H-LAF62) в табл. 1 имеет самые большие допуски к погрешности изготовления оптических элементов. Также видно, что для изготовления рассчитанных суперахроматов требуются материалы высокого качества.

График поперечной сферической aberrации объектива показан на рис. 6.

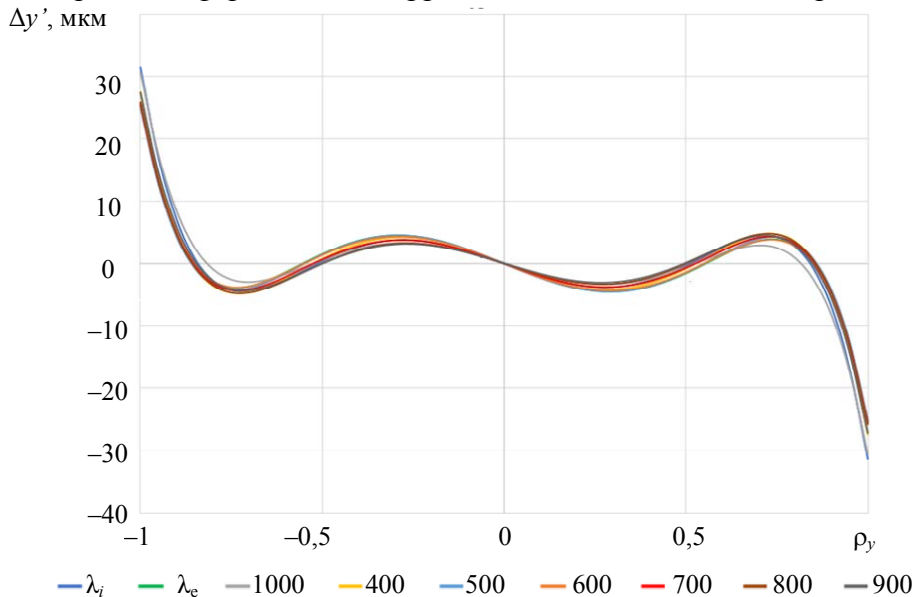


Рис. 6

В состав каждого рассмотренного в настоящей работе объектива должна входить минимум одна линза с особым ходом дисперсии, иначе оптические силы каждой отдельной линзы будут большими по модулю [2]. На рис. 2 соответствующие этим материалам точки располагаются удаленно от нормальной прямой [16, 22], в основном в нижней области графика слева. При синтезе трехлинзового апохромата с помощью разработанной программы целесообразно „фиксировать“ любой материал каким-нибудь особым стеклом или материалом с особым ходом дисперсии для существенного ускорения синтеза. Рассчитанные суперахроматы,

представленные в настоящей статье, подтверждают работоспособность разработанной авторами программы.

Заключение. Разработана программа автоматического синтеза трехлинзовых объективов с исправленным хроматизмом положения в широком спектральном диапазоне. В работе представлены полученные с использованием программы результаты синтеза объективов типа „линза со склейкой“. Найдены решения для трехлинзовых шестичветных суперахроматов в спектральном диапазоне 365—1000 нм. Приведены конструктивные параметры нескольких интересных вариантов, которые могут служить объективами телескопических систем большого увеличения и коллиматоров, работающих в широком спектральном интервале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Запругаева Л. А., Свешикова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. М.: Логос, 2000. 584 с.
2. Можаров Г. А. Геометрическая оптика. СПб: Лань, 2019. 708 с.
3. Попов Г. М. Современная астрономическая оптика. М.: Наука, 1988. 192 с.
4. Herzberger M. and McClure N. R. The design of superachromatic lenses // *Appl. Opt.* 1963. N 2. P. 553—560.
5. Mercado R. I. Designs of two-glass apochromats and superachromats // *Proc. SPIE.* 1990. Vol. 1354. Intern. Lens Design Conf. <http://doi.org/10.1117/12.47941>.
6. Хацевич Т. Н., Парко В. Л. Алгоритм расчета объективов-апохроматов с разнесенными компонентами для телескопических и коллимационных систем // *Оптич. журн.* 2012. Т. 79, № 7. С. 18—23.
7. Mikš A. and Novák J. Method for primary design of superachromats // *Appl. Opt.* 2013. Vol. 52, N 28. P. 6868—6876. <http://doi.org/10.1364/AO.52.006868>.
8. Mikš A. and Novák J. Superachromatic air-spaced triplet // *Appl. Opt.* 2014. Vol. 53, N 29. P. 6930—6937. <http://doi.org/10.1364/AO.53.006930>.
9. Грамматин А. П., Цыганок Е. А. Особенности вторичного спектра объективов коллиматоров, работающих в диапазоне длин волн 400—900 нм // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2011. Т. 54, № 9. С. 75—77.
10. Иванов С. Е., Романова Г. Э. Метод выбора оптических материалов для создания апохроматических атермализованных оптических систем // *Оптич. журн.* 2016. Т. 83, № 12. С. 25—30.
11. Болашенко О. Н., Грамматин А. П. Объективы-апохроматы без кристаллов // *Оптич. журн.* 2002. Т. 69, № 2. С. 25—30.
12. Sasian J., Gao W., Yan Y. Method to design apochromat and superachromat objectives // *Opt. Eng.* 2017. Vol. 56, N 10. P. 105106. <http://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.105106>.
13. Lu Q., Ding Y., Wang W., Liu Sh., and Xu M. VIS-NIR superachromatic triplet design with five-color correction for a broadband interferometer // *Appl. Opt.* 2022. Vol. 61, N 30 P. 8880—8888. <https://doi.org/10.1364/AO.465959>.
14. Robb P. N. Selection of optical glasses. 1: Two materials // *Appl. Opt.* 1985. Vol. 24, N 12. P. 1864—1877. <https://doi.org/10.1364/AO.24.001864>.
15. Научно-производственная компания Фотоника/Сенсор [Электронный ресурс]: <<https://www.npk-photonica.ru/product/sensors/>>.
16. Грамматин А. П., Романова Г. Э., Балащенко О. Н. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 128 с.
17. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 323 с.
18. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
19. Nguyen D. H., Bakholdin A. Program for synthesis and ranking of two-lens and three-lens objectives // *Proceeding of SPIE.* 2022. Vol. 12315. P. 9. <https://doi.org/10.1117/12.2636277>.
20. Нгуен З. Х., Бахолдин А. В. Автоматизация расчета объективов типов „склейка с линзой“ и „линза со склейкой“ // *Оптич. журн.* 2023. Т. 90, № 1. С. 12—25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-01-12-25>.
21. ZEMAX 13. Optical Design Program. User's Manual. 24 June 2015. 805 p.

22. Зверев В. А., Кривопустова Е. В., Точилиная Т. В. Оптические материалы. СПб: Лань, 2015. 400 с.

23. Окатов М. А., Антонов Э. А., Байгожин А. Справочник технолога-оптика. СПб: Политехника, 2004. 679 с.

Сведения об авторах

Нгуен Зуи Хынг

— аспирант; Университет ИТМО, центр прикладной оптики;
E-mail: 184365@niuitmo.ru

Алексей Валентинович Бахолдин

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, центр прикладной оптики; E-mail: bakholdin@itmo.ru

Поступила в редакцию 14.12.2022; одобрена после рецензирования 28.02.2023; принята к публикации 27.04.2023.

REFERENCES

1. Zapryagaeva L.A., Sveshnikova I.S. *Raschet i proyektirovaniye opticheskikh sistem* (Calculation and Design of Optical Systems), Moscow, 2000, 584 p. (in Russ.)
2. Mozharov G.A. *Geometricheskaya optika* (Geometric Optics), St. Petersburg, 2019, 708 p. (in Russ.)
3. Popov G.M. *Sovremennaya astronomicheskaya optika* (Modern Astronomical Optics), Moscow, 1988, 192 p. (in Russ.)
4. Herzberger M. and McClure N.R. *Appl. Opt.*, 1963, no. 2, pp. 553–560.
5. Mercado R.I. *Proc. SPIE*, 1990, vol. 1354, Intern. Lens Design Conf., <http://doi.org/10.1117/12.47941>.
6. Khatsevich T.N. and Parko V.L. *Journal of Optical Technology*, 2012, no. 7(79), pp. 395–398.
7. Mikš A. and Novák J. *Appl. Opt.*, 2013, no. 28(52), pp. 6868–6876, <http://doi.org/10.1364/AO.52.006868>.
8. Mikš A. and Novak J. *Appl. Opt.*, 2014, no. 29(53), pp. 6930–6937, <http://doi.org/10.1364/AO.53.006930>.
9. Grammatin A.P., Tsyganok E.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 9(54), pp. 75–77. (in Russ.)
10. Ivanov S.E. and Romanova G.E. *Journal of Optical Technology*, 2016, no. 12(83), pp. 729–733.
11. Balatsenko O.N. and Grammatin A.P. *Journal of Optical Technology*, 2002, no. 2(69), pp. 25–30.
12. Sasian J., Gao W., Yan Y. *Opt. Eng.*, 2017, no. 10(56), pp. 105106, <http://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.105106>.
13. Lu Q., Ding Y., Wang W., Liu Sh., and Xu M. *Appl. Opt.*, 2022, no. 30(61), pp. 8880–8888, <https://doi.org/10.1364/AO.465959>.
14. Robb P.N. *Appl. Opt.*, 1985, no. 12(24), pp. 1864–1877, <https://doi.org/10.1364/AO.24.001864>.
15. <https://www.npk-photonica.ru/product/sensors/>. (in Russ.)
16. Grammatin A.P., Romanova G.E., Balatsenko O.N. *Raschet i avtomatizatsiya proyektirovaniya opticheskikh sistem* (Calculation and Automation of the Design of Optical Systems), St. Petersburg, 2013, 128 p. (in Russ.)
17. Slyusarev G.G. *Raschet opticheskikh sistem* (Calculation of Optical Systems), Leningrad, 1975, 323 p. (in Russ.)
18. Rusinov M.M. *Kompozitsiya opticheskikh system* (Composition of Optical Systems), Leningrad, 1989, 383 p. (in Russ.)
19. Nguyen D.H., Bakholdin A. *Proceeding of SPIE*, 2022, vol. 12315, pp. 9, <https://doi.org/10.1117/12.2636277>.
20. Nguyen D.H. and Bakholdin A.V. *Journal of Optical Technology*, 2023, no. 1(90), pp. 6–13.
21. *ZEMAX 13. Optical Design Program. User's Manual*. June 24, 2015. 805 p.
22. Zverev V.A., Krivopustova E.V., Tochilina T.V. *Opticheskiye materialy* (Optical Materials), St. Petersburg, 2015, 400 p. (in Russ.)
23. Okatov M.A., Antonov E.A., Baygozhin A. et al. *Spravochnik tekhnologa-optika* (Reference Technologist-Optics), St. Petersburg, 2004, 679 p. (in Russ.)

Data on authors

Duy Hung Nguyen

— Post-Graduate Student; ITMO University, Center of Applied Optics;
E-mail: 184365@niuitmo.ru

Alexey V. Bakholdin

— PhD, Associate Professor; ITMO University, Center of Applied Optics;
E-mail: bakholdin@itmo.ru

Received 14.12.2022; approved after reviewing 28.02.2023; accepted for publication 27.04.2023.