

Н. А. Митюшенко^{1}, Г. Э. Романова¹*

Разработка светосильного объектива для спектрального диапазона 0,6–0,9 мкм

¹ Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
* e-mail: mit_n_a@mail.ru

Аннотация. Актуальность темы определяется потребностями оптико-электронного приборостроения в расширении элементной базы светосильных объективов для приборов ночного видения. Целью работы является анализ характеристик отечественных стекол для использования их при разработке объективов с апохроматической коррекцией аберраций в области 0,6 – 0,9 мкм. В работе используются теоретический метод расчета апохроматов для спектральной области, смещенной в ИК-диапазон, а также методы автоматизированной коррекции. Показана эффективность применения метода подбора материалов для области 0,6 – 0,9 мкм. Приведены примеры расчета компонентов. Результаты исследования будут использованы для дальнейших расчетов в рамках магистерской диссертации.

Ключевые слова: прибор ночного видения, ахроматизация, апохроматизация, светосильный объектив

N. A. Mityushenko^{1}, G. E. Romanova¹*

Development of a fast lens for the spectral range of 0.6-0.9 microns

¹ University ITMO, Saint-Petersburg, Russian Federation
* e-mail: mit_n_a@mail.ru

Abstract. The relevance of the topic is determined by the needs of optoelectronic instrumentation in expanding the element base of high-power lenses for night vision devices. The aim of the work is to analyze the characteristics of domestic glasses for use in the development of lenses with apochromatic correction of aberrations in the range of 0.6 – 0.9 microns. The paper uses a theoretical method for calculating apochromates for the spectral region shifted to the IR range, as well as methods of automated correction. The effectiveness of the application of the method of selection of materials for the field is shown 0.6 – 0.9 microns. Examples of component calculations are given. The results of the study will be used for further calculations within the framework of the master's thesis.

Keywords: night vision device, achromatization, apochromatization, fast lens

Введение

Приборы ночного видения (ПНВ) широко используются для различных целей, в том числе при ночных поисково-спасательных операциях [1], позволяют работникам экстренных служб найти и спасти человека даже при низких уровнях освещенности. Полицейские и другие правоохранительные органы могут использовать ПНВ для наблюдения за подозрительными действиями людей или для поиска преступников в условиях темноты [2, 3], а также как противодействие контрабанде и нелегальной миграции.

Актуальность разработки заключается в слабой наполненности данной ниши рынка отечественных объективов для диапазона 0,6 – 0,9 мкм, при котором работает ПНВ. Большое количество вариантов позволит потребителям выбирать объективы для более узких задач. Целью данной работы является разработка оптической схемы объектива для компактного прибора ночного видения.

Методы и материалы

Объективы, используемые в составе ПНВ, должны обеспечивать высокую светосилу (относительное отверстие от 1:2 до 1:1,25), а спектральный диапазон согласовывается со спектральной чувствительности типичного фотокатода в диапазоне 0,6 – 0,9 мкм [4, 5].

При предварительном расчете объектива с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1:1,25 в программе ZEMAX было установлено, что существенный вклад в снижение качества изображения для объективов такого рода вносит хроматизм положения [6-8].

Поэтому для получения высокого качества изображения системы необходимо проанализировать возможности апохроматизации объектива.

Для анализа стёкол был использован каталог Лыткаринского завода оптического стекла [9], как одного из основных поставщиков отечественного оптического стекла в России.

По частоте варки, стекла делятся на несколько групп. Для анализа были использованы группы I и II (постоянно изготавливаемые стёкла и стёкла, регулярно изготавливаемые через определенные промежутки времени; стёкла данных групп составляют более 98 % объёма всей выпускаемой продукции данного предприятия), а также III и IV групп, использующиеся крайне редко и имеющие особые свойства. Данные для расчета частной и относительной дисперсии взяты из программы ZEMAX для длин волн 0,6, 0,75 и 0,9 мкм. Основной принята длина волны 0,75 мкм.

На графике (рис.1) присутствуют все стекла, приведенные в каталоге ЛЗОС, кроме двух – ТФ-7 и КФ-4, что связано с неточностями представленных в каталоге данных. Большинство точек будет лежать вблизи «нормальной» прямой, определяемой значениям относительной частной дисперсии и коэффициентом дисперсии для стёкол марок К18 и Ф13.

С использованием полученной карты стекол можно выполнить подбор материалов и расчет объектива. Для этого необходимо представить графики (рис. 2) зависимости относительной частной дисперсии на требуемом участке спектра от коэффициента дисперсии [10-12].

Для апохроматизации объектива графоаналитическим методом выбираются три точки, образующие треугольник. Чем дальше будут располагаться эти точки от нормальной прямой, тем проще апохроматизировать объектив. Чем больше выйдет площадь полученного треугольника, тем меньше в системе крутых радиусов кривизны [13].

Например, рассмотрим комбинацию стекол ОФ-4, ОФ-6 и ТК-20 (рис. 2).

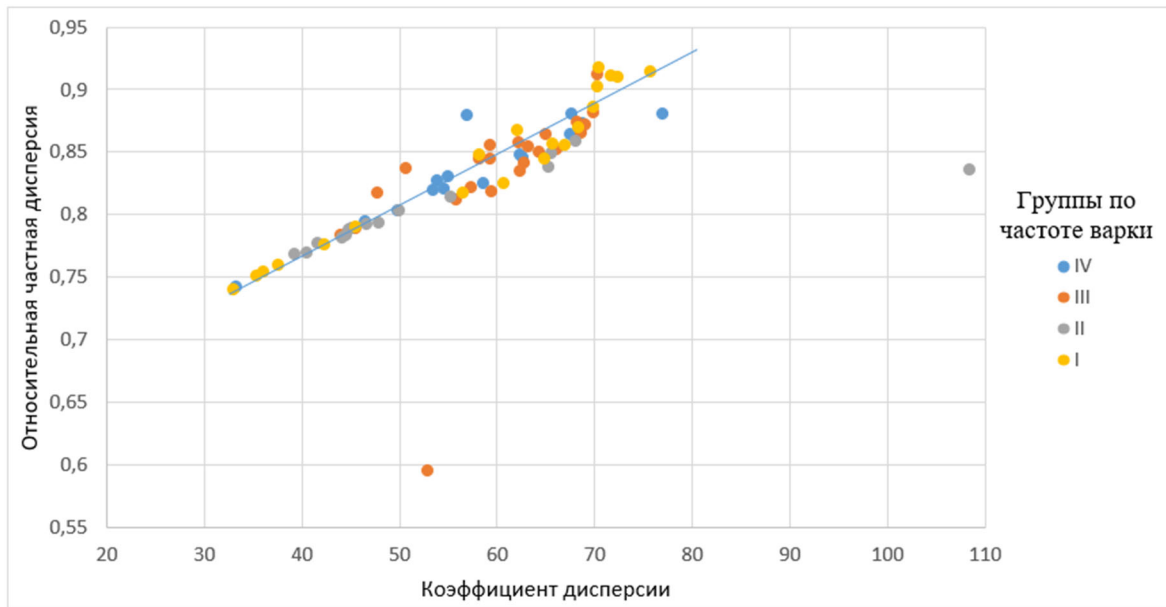


Рис. 1. Зависимость относительной частной дисперсии от коэффициента дисперсии

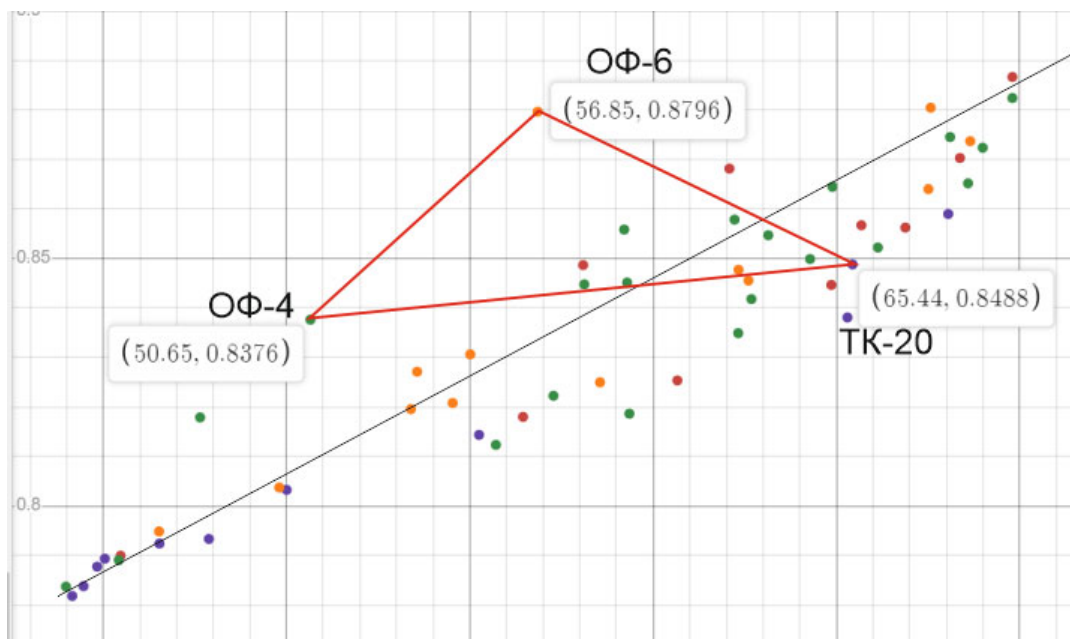


Рис. 2. Выбор стёкол по графоаналитическому методу

Воспользовавшись выражениями [14, 15], можно определить оптические силы компонентов:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1 \quad (1)$$

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} + \frac{\varphi_3}{\nu_3} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} P_1 + \frac{\varphi_2}{\nu_2} P_2 + \frac{\varphi_3}{\nu_3} P_3 = 0 \quad (3)$$

где φ – оптическая сила; ν – коэффициент дисперсии для расчётного спектрального диапазона; P – относительная частная дисперсия.

Уравнение (1) является уравнением масштаба. Уравнение (2) – условие ахроматизации. Уравнение (3) – условие апохроматизации. Решая совместно уравнения (1) и (3) получены оптические силы компонентов -0,133, -0,00713 и 0,180 дптр для стекол ОФ-4, ОФ-6 и ТК-20 соответственно. На основании расчётных значений был смоделирован объектив в тонких компонентах (рис. 3). В результате получился полуапохромат. Для достижения полной апохроматизации необходимо воспользоваться методами автоматизированной коррекции.

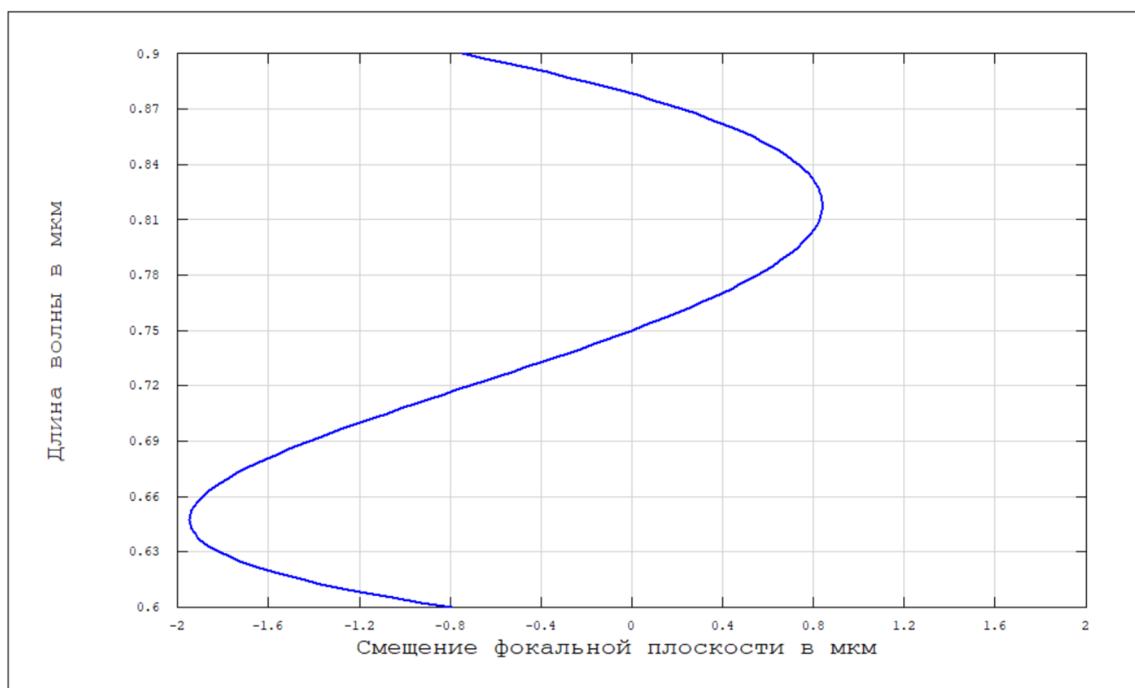


Рис. 3. Хроматизм положения объектива

Результаты

В ходе расчета был получен объектив-апохромат (рис. 4) с фокусным расстоянием 25 мм с остаточным хроматизмом 2,6 мкм (рис. 5)

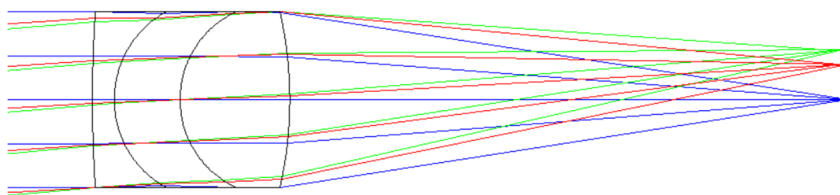


Рис. 4. Внешний вид объектива

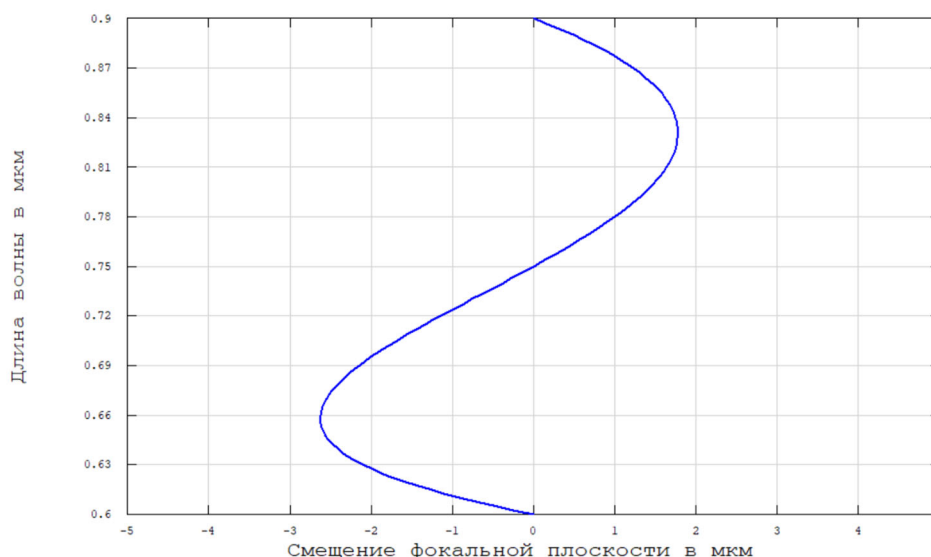


Рис. 5. Хроматизм положения рассчитанного объектива

Обсуждение

Использованный в данной работе графоаналитический метод подбора стёкол для апохроматизации имеет несколько недостатков: относительно длительный пересчет характеристик стёкол под требуемый диапазон; необходимость расчета оптических сил компонентов через систему линейных алгебраических уравнений. Однако, несмотря на особенности метода, он позволяет наглядно определить необходимые марки для апохроматизации.

Заключение

В ходе выполнения данной работы был получен объектив-апохромат с требуемым фокусным расстоянием. В дальнейшем необходимо увеличить светосилу объектива, увеличить поле, а также исправить остаточные aberrации, в частности кому и кривизну по полю.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов Ю.А., Тяпкин Б.В. Инфракрасная техника в военном деле. - М.: Типография №1 Госэнергоиздата, 1963. – 359 с.
2. Шестаков К. М. Курс лекций по специальному курсу «Физические основы формирования изображений» — Минск: БГУ, 2012.
3. Попов Г.М. Современная астрономическая оптика. М.: Наука, 1988. – 95 с.
4. Электронно-оптические преобразователи // katodnv.com URL: <https://katodnv.com/catalog/elektronno-opticheskie-preobrazovateli/> (дата обращения: 06.01.2024).
5. Хацевич Т. Н. Компьютерные методы проектирования оптических систем / Т. Н. Хацевич — Новосибирск: СГУГиТ, 2022 — 156 с.
6. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. - 3-е изд. - М.: Машиностроение, 1992. - 449 с.
7. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. – Л.: Машиностроение, 1966. - 312 с.
8. Грамматин А.П., Балащенко О.Н., Романова Г.Э. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем: учеб. пособие. - СПб.: ИТМО, 2013. - 128 с.

9. Стекло оптическое бесцветное неорганическое // LZOS.RU URL: <https://lzos.ru/products/bestsvetnoe/steklo-opticheskoe-bestsvetnoe/> (дата обращения: 06.01.2024).
10. Иванов С.Е., Романова Г.Э. Метод выбора оптических материалов для создания апохроматических атермализованных оптических систем // Оптический журнал. 2016. - Т. 83. - № 12. - С. 25–30.
11. Архипов С.А., Кушнарев К.Г., Скляр С.Н. Апохроматические объективы для гиперспектральной аппаратуры // КОНТЕНАНТ. - 2014. - №1. - С. 36-44.
12. Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. Моделирование и исследование коррекции хроматизма оптических систем, линзы которых выполнены из материалов, допускающих прецизионное прессование // Компьютерная оптика. - 2015. - №4. - С. 529-535.
13. Дмитерко Р.А., Страхов А.А. Аналитический расчет конструктивных параметров тонкого триплета-ахромата // Аллея Науки. - 2020. - №3
14. R.I. Mercado and P.N. Robb, «Calculation of refractive Indices using Buchdahl's Chromatic Coordinate», Appl. Opt. – 1983 - 22 - p. 1198.
15. P.J. Reardon and R.A. Chipman, «Buchdahl's glass dispersion coefficients calculated from Schott equation constant», Appl. Opt. – 1989 - 28(15). p. 3520 - 3523.

© Н. А. Митюшенко, Г. Э. Романова, 2024