

Исследование и расчет двухкомпонентного компенсатора хроматических aberrаций

© Л.Н. Андреев, Е.А. Цыганок, Е.Б. Сошникова[✉], А.Д. Кожина

Университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

[✉] e-mail: jane.soshnicova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

В окончательной редакции 15.04.2022 г.

Принята к публикации 16.04.2022 г.

Исследован компенсатор хроматических aberrаций из двух гиперхроматических линз. Получены зависимости значений хроматических aberrаций от параметров двухкомпонентного компенсатора. На основании теоретических данных рассчитан компенсатор aberrаций для высокоапертурных иммерсионных ахроматических объективов микроскопа.

Ключевые слова: объектив микроскопа, ахромат, хроматическая aberrация, гиперхроматические линзы, хроматизм увеличения, хроматизм положения.

DOI: 10.21883/OS.2022.08.52918.2819-22

Введение

В наши дни микроскопы находят широкое применение в медицине и различных отраслях промышленности [1–4]. Объектив является самым важным компонентом микроскопа [5–7]. Именно от его характеристик и степени коррекции aberrаций зависит качество оптической системы в целом [8,9]. Наиболее широкое распространение получили ахроматические объективы, обладающие достаточной для большинства случаев степенью коррекции aberrаций и относительно низкой стоимостью [10]. Несмотря на то, что в ахроматических объективах малых и средних числовых апертур и увеличений удается практически полностью корригировать большинство aberrаций, для высокоапертурных объективов с большим увеличением эта проблема остается актуальной. Одной из главных задач остается устранение хроматических aberrаций. Обычно с этой целью в микроскопах применяют компенсационные окуляры [11,12], имеющие сложную оптическую схему. Однако если в качестве приемника излучения выступает матрица, компенсировать хроматические aberrации с помощью окуляра не представляется возможным.

Поэтому весьма эффективным оказывается применение специального двухкомпонентного компенсатора, схема которого представлена на рис. 1. Компоненты — гиперхроматические линзы — представляют собой плоскопараллельные пластинки, состоящие из двух склеенных линз, выполненные из стекол с близкими для основной длины волны показателями преломления, но с существенно различными коэффициентами средней дисперсии [13,14]. Компоненты отделены друг от друга воздушным промежутком d значительной величины. Двухкомпонентный компенсатор позволяет одновременно исправить хроматизм увеличения и хроматизм поло-

жения. Введенный в систему в параллельных или слабо сходящихся пучках лучей, он практически не влияет на монохроматические aberrации.

Если расстояние от предмета до первого компонента компенсатора $s_1 = \infty$, хроматизм увеличения определяется выражением [15]:

$$\frac{dy'}{y'_{1,2}} = \frac{d}{r_1} (dn_1 - dn_2), \quad (1)$$

где $\frac{dy'}{y'_{1,2}}$ — хроматизм увеличения первого порядка, определяемый по формуле

$$\frac{dy'}{y'_{1,2}} = \frac{y'_{\lambda_2} - y'_{\lambda_1}}{y'_{\lambda_0}}, \quad (2)$$

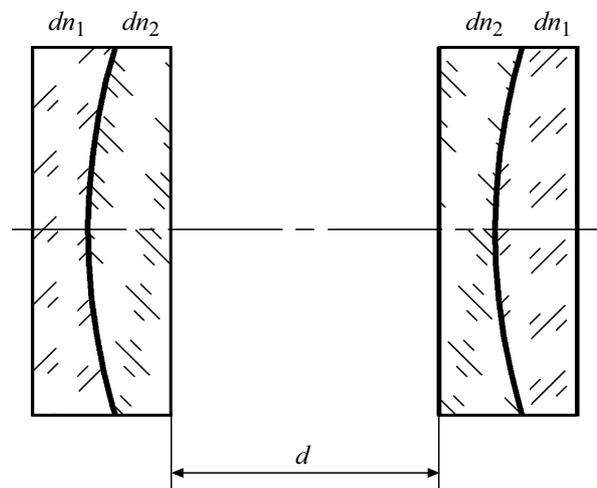


Рис. 1. Компенсатор хроматических aberrаций из двух гиперхроматических линз.

где $y'_{\lambda_1}, y'_{\lambda_2}, y'_{\lambda_0}$ — величина изображения для соответствующей длины волны, λ_0, λ_1 и λ_3 — основная и крайние длины волн выбранного спектрального диапазона; d — расстояние между гиперхроматическими линзами; r_1 — хроматический радиус; dn_1 и dn_2 — средние дисперсии стекол, определяемые по формуле

$$dn = n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}, \quad (3)$$

где $n_{\lambda_1}, n_{\lambda_2}$ — показатели преломления стекла для крайних длин волн выбранного спектрального диапазона.

Задав желаемое значение хроматизма увеличения, из выражения (1) можно получить аналитическое значение хроматического радиуса r_1 . Расчет двухкомпонентного компенсатора сводится к выбору хроматической пары стекол и нахождению значения „хроматического“ радиуса при заданных толщинах компонентов, расстоянии между ними и расстоянии между объективом и первым компонентом [15].

Исследование и расчет двухкомпонентного компенсатора хроматических aberrаций

Исследование и расчет двухкомпонентного компенсатора хроматических aberrаций проводились для серийного ахроматического объектива ОМ-41 с увеличением $90\times$, числовой апертурой 1.25 и фокусным расстоянием 1.96 mm [16], в спектральном диапазоне F–d–C.

В ходе исследования были рассмотрены 50 пар стекол, рекомендованных в литературе в качестве хроматических, различные их комбинации и несколько комбинаций стекол из таблицы Трубка [17,18]. Используя инструменты оптимизации и целевой функции в программе Zemax OpticStudio, из каждой пары были рассчитаны компенсаторы для объектива ОМ-41 и получены значения aberrаций. В табл. 1 представлены пять пар стекол с минимальным абсолютным значением хроматизма увеличения. Для всех представленных пар стекол волновая

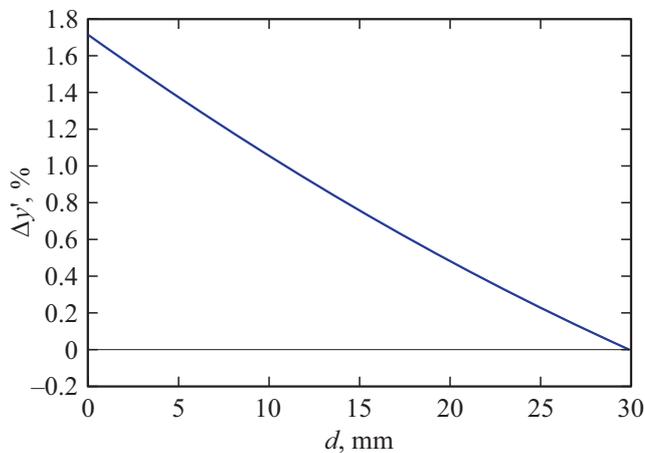


Рис. 2. График зависимости хроматизма увеличения от расстояния между гиперхроматическими линзами компенсатора.

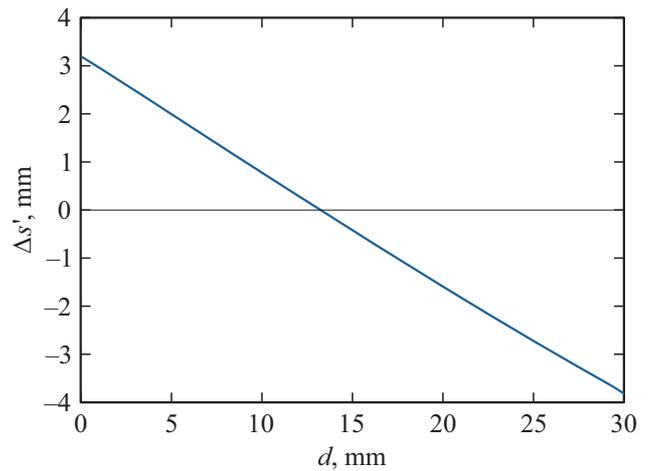


Рис. 3. График зависимости хроматизма положения от расстояния между гиперхроматическими линзами компенсатора.

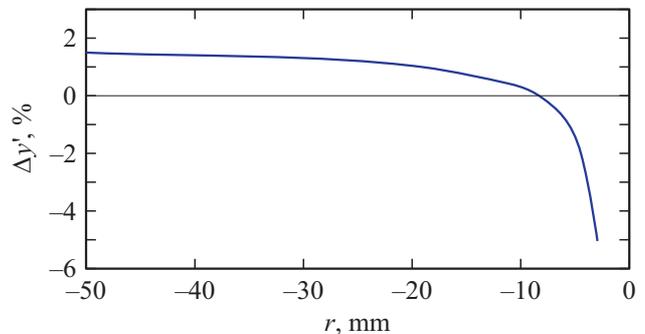


Рис. 4. График зависимости хроматизма увеличения от хроматического радиуса.

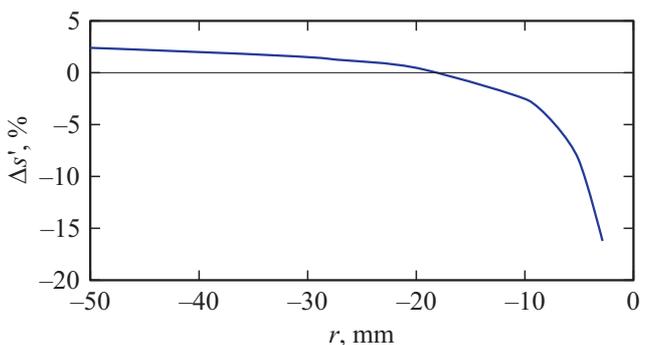


Рис. 5. График зависимости хроматизма положения от хроматического радиуса.

aberrация на краю зрачка для основной длины волны W_d с точностью до сотых равняется 0.

Лучший результат по исправлению aberrации хроматизма увеличения показала пара стекол LZ_TK14–LZ_F1 из каталога LZOS. Поэтому дальнейшие исследования проводились на основе компенсатора из этой пары стекол. Рассматривались различные вариации расположения гиперхроматических линз. В каждой

Таблица 1. Пары стекол с минимальным абсолютным значением хроматизма увеличения

№	1	2	3	4	5
Марки стекол	LZ_TK14/LZ_F1	LZ_TK16/LZ_F1	LZ_CTK9/LZ_TF4	LZ_FK24/LZ_ЛФ9	LZ_CTK12/LZ_TF8
Хроматический радиус r_1 , mm	-8.36	-8.08	-15.30	-8.58	-13.22
Хроматизм увеличения для крайней точки поля $\Delta y'$, %	0.00	0.04	0.11	0.12	0.16
Хроматизм положения для осевой точки поля $\Delta s'$, mm	-3.74	-3.51	-3.61	-3.49	-3.42
Волновая aberrация на краю зрачка для длины волны $F W_F$, waves	-1.65	-1.61	-1.61	-1.61	-1.58
Волновая aberrация на краю зрачка для длины волны $C W_C$, waves	-0.18	-0.19	-0.19	-0.19	-0.20
2-я сумма Зейделя S_{II}	1.01	0.97	1.03	1.12	1.06
3-я сумма Зейделя S_{III}	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12
Дисторсия для крайней точки поля, %	0.70	0.70	0.70	0.71	0.70

Таблица 2. Сравнение различных вариантов компенсатора из пары стекол ТК14-Ф1

Марки стекол	LZ_TK14/LZ_F1–LZ_F1/LZ_TK14		LZ_F1/LZ_TK14–LZ_TK14/LZ_F1	
	$r_1 = r_2,$ $r_1 < 0$	$r_1 = -r_2,$ $r_1 > 0$	$r_1 = r_2,$ $r_1 > 0$	$r_1 = -r_2,$ $r_1 < 0$
Накладываемые на радиусы условия				
Хроматический радиус r_1 , mm	-8.35964	14.26610	8.60148	-14.41250
Хроматизм увеличения для крайней точки поля $\Delta y'$, %	-0.00112	0.11280	-0.00114	0.10956
Хроматизм положения для осевой точки поля $\Delta s'$, mm	-3.74350	24.54295	-3.55347	24.33285
Волновая aberrация на краю зрачка для длины волны $F W_F$, waves	-1.64912	2.49267	-1.61189	2.46255
Волновая aberrация на краю зрачка для длины волны $d W_d$, waves	-0.00002	0.00149	-0.00002	0.00143
Волновая aberrация на краю зрачка для длины волны $C W_C$, waves	-0.17760	-1.34485	-0.18911	-1.33660
2-я сумма Зейделя S_{II}	1.00563	0.99330	0.99623	0.99023
3-я сумма Зейделя S_{III}	0.11240	0.11197	0.11238	0.11196
Дисторсия для крайней точки поля, %	0.69954	0.69831	0.70080	0.69878

комбинации разницы средних дисперсий первого и второго компонентов имеют противоположные знаки, а хроматические радиусы равны по модулю. Значения aberrаций для различных комбинаций представлены в табл. 2. Видно, что компенсатор, состоящий из компонентов с двумя равными отрицательными хроматическими радиусами, превосходит по степени коррекции хроматизма увеличения прочие рассмотренные компенсаторы.

При дальнейшем изучении данного компенсатора были исследованы зависимости хроматических aberrаций от его параметров — расстояния между компонентами компенсатора и величины „хроматического“ радиуса. По графикам, представленным на рис. 2–5, видно, что, изменяя любой из указанных параметров, возможно добиться оптимальных значений хроматических aberrаций положения и увеличения.

Таблица 3. Монохроматические и хроматические aberrации объектива ОМ-41 (увеличение $90\times$, числовая апертура 1.25 и линейное поле зрения в пространстве предметов 0.2 mm) без и с компенсатором

Аберрация	Без компенсатора	С компенсатором
Волновая аберрация на краю зрачка для длины волны d W_d , waves	0.00	0.00
Волновая аберрация на краю зрачка для длины волны F W_F , waves	-0.55	-1.65
Волновая аберрация на краю зрачка для длины волны C W_C , waves	-0.52	-0.18
Кома в меридиональной плоскости для крайней точки поля s'_{coma} , mm	0.03	0.03
Астигматический отрезок в меридиональной плоскости для крайней точки поля s'_{tan} , mm	-20.95	-20.82
Астигматический отрезок в сагитальной плоскости для крайней точки поля s'_{sag} , mm	-15.96	-15.85
Дисторсия для крайней точки поля, %	0.71	0.70
Хроматизм увеличения для крайней точки поля $\Delta u'$, %	1.83	0.00
Хроматизм положения для осевой точки поля $\Delta s'$, mm	3.68	-3.74

Таблица 4. Монохроматические и хроматические aberrации объектива ОХ-32 (увеличение $100\times$, числовая апертура 1.25 и линейное поле зрения в пространстве предметов 0.2 mm) без компенсатора и с компенсатором

Аберрация	Без компенсатора	С компенсатором	
		$d = 29.45$ mm	$d = 22.45$ mm
Волновая аберрация на краю зрачка для длины волны d W_d , waves	0.10	0.25	0.25
Волновая аберрация на краю зрачка для длины волны F W_F , waves	-0.46	-1.25	-1.05
Волновая аберрация на краю зрачка для длины волны C W_C , waves	-0.41	0.01	-0.05
Кома в меридиональной плоскости для крайней точки поля s'_{coma} , mm	0.21	0.21	0.21
Астигматический отрезок в меридиональной плоскости для крайней точки поля s'_{tan} , mm	-33.06	-34.11	-34.13
Астигматический отрезок в сагитальной плоскости для крайней точки поля s'_{sag} , mm	-29.59	-30.66	-30.68
Дисторсия для крайней точки поля, %	0.71	0.72	0.71
Хроматизм увеличения для крайней точки поля $\Delta u'$, %	2.02	0.01	0.40
Хроматизм положения для осевой точки поля $\Delta s'$, mm	2.87	-5.47	-3.71

В результате был рассчитан компенсатор хроматизма увеличения для объектива ОМ-41 с увеличением $90\times$, числовой апертурой 1.25 и линейным полем зрения в пространстве предметов 0.2 mm. В табл. 3 представлено сравнение значений монохроматических и хроматических aberrаций до и после применения компенсатора. Оптическая схема объектива ОМ-41 с компенсатором хроматических aberrаций представлена на рис. 6.

Рассчитанный компенсатор был применен для коррекции хроматизма увеличения в ахроматическом объективе ОХ-32 с увеличением $100\times$, числовой апертурой 1.25 и фокусным расстоянием 1.89 mm [19].

Для компенсатора были пересчитаны хроматический радиус и расстояние между компонентами. В результате остаточное значение хроматизма увеличения составило 0.01%. Однако то, что компенсатор был помещен в слабо сходящемся пучке лучей, привело к ухудшению хроматической aberrации положения. Уменьшив расстояние между компонентами и, следовательно, несколько ухудшив значение хроматизма увеличения, удалось улучшить значение хроматизма положения. Остаточное значение хроматизма увеличения в объективе составило 0.4%. Значения монохроматических и хроматических aberrаций на каждом этапе расчета представлены

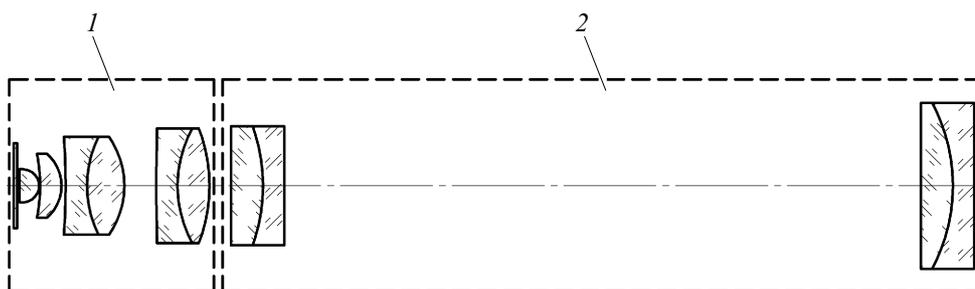


Рис. 6. Оптическая схема объектива ОМ-41 (увеличение $90\times$, числовая апертура 1.25 и линейное поле зрения в пространстве предметов 0.2 mm) с компенсатором хроматических aberrаций: 1 — объектив, 2 — компенсатор хроматических aberrаций.

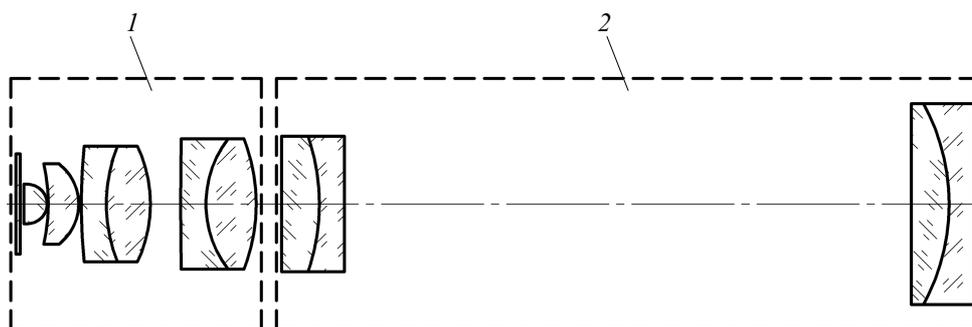


Рис. 7. Оптическая схема объектива ОХ-32 (увеличение $100\times$, числовая апертура 1.25 и линейное поле зрения в пространстве предметов 0.2 mm) с компенсатором хроматических aberrаций: 1 — объектив, 2 — компенсатор хроматических aberrаций.

в табл. 4. Оптическая схема объектива с компенсатором представлена на рис. 7.

Заключение

Для двух высокоапертурных иммерсионных ахроматических объективов ОМ-41 и ОХ-32 в работе был рассчитан компенсатор хроматизма увеличения; с его помощью в объективе ОМ-41 с сохранением общего качества объектива удалось полностью исправить хроматизм увеличения при его начальной величине 1.83%; в объективе ОХ-32 хроматизм увеличения был уменьшен с 2.02 до 0.40%. Это позволит использовать объективы с обычными окулярами, либо применять в микроскопе в качестве приемника излучения ПЗС-матрицу.

Кроме того, предложенная методика расчета компенсатора позволяет спроектировать компенсатор с любыми необходимыми значениями хроматизма увеличения как по величине, так и по знаку, без внесения других aberrаций. Это позволяет использовать его не только для коррекции aberrаций большинства микрообъективов, но и для других оптических систем, требующих минимизацию хроматических aberrаций, например, при работе с цифровыми приемниками оптического излучения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W.J. Croft. *Under the Microscope a Brief History of Microscopy* (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006).
- [2] T.S. Tkaczyk. *Field guide to microscopy* (SPIE Press, Bellingham, Washington, 2010).
- [3] А.И. Гуляев, И.В. Исходжанова, П.Л. Журавлева. Труды ВИАМ. (7), (2014). <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-metoda-opticheskoy-mikroskopii-dlya-kolichestvennogo-analiza-struktury-pkm>
- [4] S. Eswarappa Prameela, P.M. McGuigan, A. Brusini et al. *Nat. Rev. Mater.* **5**, 865–867 (2020). DOI: 10.1038/s41578-020-00246-z
- [5] В.А. Панов, Л.Н. Андреев. *Оптика микроскопов. Расчет и проектирование* (Машиностроение, Л., 1976).
- [6] H. Gross. *Handbook of Optical Systems* (Wiley, Hoboken, New Jersey, 2008), V. 4, Survey of Optical Instruments.
- [7] M. Abramowitz. *Microscope: Basics and Beyond*. Revised Edition (New York Microscopical Society. For Olympus America Inc., 2003), V. 1.
- [8] R.O. Wayne. *Light and Video Microscopy 2nd Edition*. (Academic Press, Cambridge, Massachusetts, 2014).
- [9] J. Sanderson. *Understanding Light Microscopy* (Wiley, Hoboken, 2019).
- [10] Л.Н. Андреев, Е.В. Абдалова, И.О. Голодкова, А.В. Козлова, Е.В. Кривошеева. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **6** (11), 258–262 (2006).
- [11] Г.И. Цуканова. *Габаритный расчет и выбор компонентов оптических систем микроскопов. Учебное пособие* (Университет ИТМО, СПб, 2015).

- [12] Л.Н. Андреев. Оптико-механическая промышленность. **58** (6), 40 (1991).
- [13] Л.Н. Андреев. Приборостроение, **42** (5–6), 66 (1999).
- [14] Л.Н. Андреев, В.В. Ежова, Г.С. Дегтярева. Оптический журнал, **80** (12), 31–36 (2013).
- [15] Л.Н. Андреев, В.В. Ежова. *Прикладная теория аберраций. Часть первая: Учебное пособие* (Университет ИТМО, СПб, 2020).
- [16] Г.Е. Скворцов. *Микроскопы* (Машиностроение, Л., 1969).
- [17] А.П. Грамматин, Г.Э. Романова, О.Н. Балащенко. *Расчет и автоматизация проектирования оптических систем. Учебное пособие* (НИУ ИТМО, СПб, 2013).
- [18] С.В. Трубка. *Расчет двухлинзовых склеенных объективов: Справочник* (Машиностроение, Л., 1984).
- [19] L.N. Andreev. J. Opt. Technol., **67**, 368 (2000).
- [20] <https://opg.optica.org/jot/abstract.cfm?URI=jot-67-4-368>