

УДК 681.7.037

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-786-790

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.С. Екименкова, А.О. Вознесенская, Т.В. Точилина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: asekimenkova@itmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.09.20, принята к печати 30.10.20
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Екименкова А.С., Вознесенская А.О., Точилина Т.В. Особенности применения оптических полимеров при проектировании оптических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 786–790. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-786-790

Аннотация

Предмет исследования. Приведен анализ механических и оптических свойств современных оптических полимерных материалов. Представлен результат проектирования и характеристики качества телескопических очков небольшого увеличения, выполненных из современных оптических полимеров и предназначенных для применения в медицине, при производстве микросхем, ювелирных изделий и др. **Метод.** Расчет телескопических очков выполнен по схеме Галилея на основе автоматизированного метода коррекции аберраций. Выполнены требования исключения необходимости дополнительной аккомодации глаз при переходе от наблюдения с очками и без них за счет расположения объекта и изображения в одной плоскости. **Основные результаты.** Полученная оптическая система имеет дифракционное качество изображения, при этом масса полностью полимерных очков в два раза ниже, чем у аналогов, выполненных из стекла. **Практическая значимость.** Современные оптические полимеры обладают улучшенными механическими и оптическими свойствами, что создает перспективу замены стеклянных компонентов на полимерные и создания полностью полимерных оптических систем, имеющих высокие характеристики качества. Технологии изготовления компонентов из оптических полимеров позволяют получать также поверхности сложной формы (киноформы, асферика, «freeform» и др.). Обеспечивается решение технических задач, связанных с масштабированием производства, уменьшением трудоемкости сборки, совершенствованием конструкции, снижением массогабаритных свойств, а также себестоимости изделий.

Ключевые слова

оптические полимеры, проектирование оптических систем, телескопические очки, асферика, качество изображения

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-786-790

APPLICATION FEATURES OF OPTICAL POLYMERS IN OPTICAL SYSTEMS DESIGN

A.S. Ekimenkova, A.O. Voznesenskaya, T.V. Tochilina

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: asekimenkova@itmo.ru

Article info

Received 15.09.20, accepted 30.10.20
 Article in Russian

For citation: Ekimenkova A.S., Voznesenskaya A.O., Tochilina T.V. Application features of optical polymers in optical systems design. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 786–790 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-786-790

Abstract

Subject of Research. The paper considers analysis of mechanical and optical properties of modern optical polymer materials. We present the result of design and quality characteristics of small magnification telescopic glasses, made of modern optical polymers and intended for application in medicine, production of microelectronic circuits, and jewelry. **Method.** Calculation of telescopic glasses is carried out according to Galileo scheme on the basis of the automated method of aberration correction. The requirements are fulfilled concerning the necessity exception of additional

accommodation of eyes at transition from observation with and without glasses, due to the object and image location in one plane. **Main Results.** The obtained optical system has diffraction image quality, and the mass of fully polymer glasses is two times lower than that of analogues made of glass. **Practical Relevance.** Modern optical polymers have advanced mechanical and optical properties, and create the perspective of glass component replacement with polymer ones and fabrication of fully polymeric optical systems with high quality characteristics. At the same time, manufacturing technologies of components made of optical polymers provides to obtain surfaces of complex shape (kinofoms, aspherics, and “freeforms”). Technical problems can be solved associated with the scaling of production, reducing of the assembly labor intensity, updating of the design, reducing of the mass and dimensional properties, and the cost of products.

Keywords

optical polymers, optical system design, telescopic glasses, aspherics, image quality

Введение

Линзы из полимерных оптических материалов изготавливаются методом литья под давлением, благодаря чему компоненты пластмассовой оптики могут иметь высокие коэффициенты асферики, поверхности свободной формы («freeform»), выполняющие компенсацию aberrаций и преобразование формы пучков. Оптические полимеры также широко применяются для создания специальных элементов, таких как линзы Френеля и киноформы, массивы микролинз, дифракционные решетки и др. [1].

Современные производители оптических полимеров предоставляют широкий выбор оптических и физических характеристик, которые зависят от области применения. На сегодняшний день показатель преломления оптического стекла достигает значения 1,90, а оптических полимеров — 1,74. Пластмассы с таким показателем преломления производятся японской компанией Mitsui Chemicals¹. Линейка оптических полимеров с высокими показателями преломления предназначена для производства офтальмологических компонентов и позволяет создавать тонкие и эстетичные линзы для очков даже с учетом высокой оптической силы компонентов. Кроме того, двумя сравнительно новыми разработанными материалами стали циклоолефиновые сополимеры, широко известные под торговым названием Zeonex², а также под названиями Arel¹ и Topas³. Данные материалы являются первыми пластмассами, разработанными специально для оптических решений, и обладают свойствами, схожими с акрилом, но с более высокой термической стойкостью и меньшим водопоглощением. Кроме того, стали доступны оптические марки полиэтримида, наиболее известные под торговым названием ULTEM⁴ и полиэфирсульфона под именем RADEL⁵. Эти материалы также обладают

стойкостью к высоким температурам, превосходящей другие оптические пластмассы, а также относительно высокими показателями преломления. Другим, недавно появившимся на рынке, материалом является оптический полиэстер, один из примеров которого — ОКР4 производства компании Gas Chemicals в Осаке⁶. Данный материал имеет показатель преломления более 1,6, и низкие двулучепреломление и число Аббе.

Механические и оптические свойства оптических полимеров

Ввиду своей молекулярной структуры и разнообразию химического состава, прежде чем использовать полимерные материалы в оптических приложениях (объективы и окуляры, волоконная оптика, фильтры, поляризационные пластины и др.) следует ознакомиться с их свойствами. В табл. 1 приведены основные механические характеристики наиболее распространенных оптических полимерных материалов в сравнении со стеклом К8.

Одним из первостепенных значений для приборостроения является плотность материала. Для стекла этот показатель варьируется в пределах 2,3–6,3 г/см³. При этом самый тяжелый оптический полимер имеет плотность всего около 1,4 г/см³, а самый легкий — 0,83 г/см³. Меньшая плотность является бесспорным преимуществом полимерных материалов, так как в ходе проектирования и расчета оптических систем, массогабаритные характеристики зачастую имеют решающее значение. Кроме того, общее количество элементов может быть уменьшено за счет включения асферических поверхностей, а производство полимерных оптических элементов будет значительно менее сложным и затратным, чем стеклянных аналогов [2, 3]. Решения, связанные с использованием оптических полимеров, должны включать в себя учет предполагаемой тепловой среды. Полимеры имеют гораздо более низкие предельные рабочие температуры. Кроме того, теплопроводность полимеров на порядок ниже, чем у стекла, а коэффициенты термического расширения больше. В связи с этим воздействие значительного теплового эффекта на полимерный оптический элемент может привести к возникновению резких тепловых переходов в материале и, как следствие, к изменениям оптиче-

¹ Mitsui Chemicals Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://jp.mitsuichemicals.com>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 25.09.2020).

² Zeonex [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.zeonex.com>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 25.09.2020).

³ Topas [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://topas.com>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 25.09.2020).

⁴ Ultem [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.aetnaoplastics.com/products/d/Ultem>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 25.09.2020).

⁵ Radel [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.solvay.com/en/brands/radel-ppsu>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 25.09.2020).

⁶ Gas Chemicals [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ogc.co.jp/e/products/fluorene/okp.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 25.09.2020).

Таблица 1. Механические характеристики полимеров и стекла К8

Материал	Полиметил-метакрилат	Полиэстер	Полистирол	Поликарбонат	Циклоолефиновые со(полимеры)	Стекло К8
Плотность, г/см ³	1,80	1,22	1,05	1,25	0,95	2,51
Коэффициент жесткости	6,00	7,80	6,40–6,70	6,70	5,60	32,70
Максимальная рабочая температура, °С	85	125	75	120	150	более 400
Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁴ /К	60	72	50	68	60	7,10
Поглощение воды, %	0,30	0,15	0,10	0,20	менее 0,01	0

ских параметров (радиусов кривизны линз, толщин, воздушных промежутков, показателя преломления и др.), вызванных тепловым воздействием [4, 5]. В этом случае рекомендуется использовать пластиковые оправы, поскольку коэффициенты линейного расширения материала оправы и полимерного компонента близки друг к другу, а отклонение температуры от номинального значения не приведет к деформации линзы или ее смещению в зазоре. Различные технологии изготовления могут повлиять на термические свойства, в связи с чем следует выполнять тепловой расчет системы на этапе конструирования согласно характеристикам, заявленным производителем [6].

При рассмотрении оптических свойств любого полимерного материала необходимо учитывать, что в зависимости от молекулярно-массового состава возможны некоторые отклонения значений показателя преломления. Примеси для регулирования маслянистости, цвета и т. д. также могут вызывать незначительные изменения спектральных пропускающих характеристик. В табл. 2 представлены оптические свойства наиболее распространенных полимерных материалов в сравнении со стеклом К8 для длины волны 633 нм.

Химический состав углеродных полимеров заметно отличается от обычных стекол и неорганических кристаллов, широко используемых в качестве оптических материалов, поэтому преломляющие свойства также различны. В целом показатели преломления полимеров ниже: минимальное значение составляет 1,3, в то время как максимальное достигает 1,75. Коэффициенты дисперсии оптических полимеров варьируются от 20 до 100. Основная задача оптического расчета обычно заключается в одновременной коррекции монохроматических и контроле хроматических aberrаций, первого и более высоких порядков, которая может быть реализована, если используемые материалы имеют аналогич-

ные соотношения числа Аббе к показателю преломления для основной длины волны. Лучшие комбинации таких материалов составляют полностью полимерные оптические системы, а также сочетание полимерных и стеклянных оптических компонентов.

Расчет оптической системы полимерных телескопических очков

В качестве примера применения современных оптических полимеров предложена оптическая система телескопических очков небольшого увеличения, широко применяемых в медицине, для производства микроэлектронных схем, ювелирных изделий и др. Особым требованием при разработке очков является исключение необходимости дополнительной аккомодации глаз при переходе от наблюдения с очками и без них. Этот критерий достигается за счет расположения объекта и изображения в одной плоскости (рис. 1).

Расчет оптической системы основан на двухэтапном методе автоматической коррекции aberrаций.

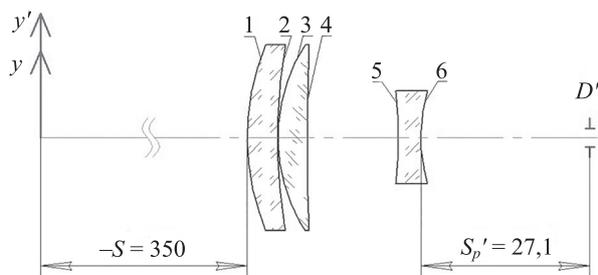


Рис. 1. Оптическая система телескопических очков, где y — величина предмета; y' — величина изображения; S — передний отрезок; S_p' — положение выходного зрачка; D' — диаметр выходного зрачка

Таблица 2. Оптические свойства полимеров

Материал	Полиметил-метакрилат	Полиэстер	Полистирол	Поликарбонат	Циклоолефиновые со(полимеры)	Стекло К8
Пропускание, %	96	94	90	89	92	92
Показатель преломления	1,491	1,607	1,590	1,585	1,533	1,516
Число Аббе	57	27	31	30	58	64
Двулучепреломление (по шкале от 1 до 10)	4	2	10	7	2	1

Первоначально реализуется габаритный расчет системы и определяются параметры для оптимизации. На втором этапе выполняется серия расчетов для контроля траектории луча в исходной и модифицированной схемах, при необходимости изменяются пределы оптимизационных параметров для получения наилучшего качества изображения и соблюдения технических требований.

Исходные характеристики оптической системы, которые определены исходя из конструкторских соображений: линейное увеличение β подобных систем находится в пределах $1,5-3^{\times}$. Благодаря небольшому увеличению, оптическая система построена по схеме Галилея, не требующей применения оборачивающих элементов. Расстояние a между главной плоскостью первого компонента и плоскостью предмета и изображения — обычно составляет 300–400 мм. При выборе численного значения расстояния между главными плоскостями компонентов d учитывались аспекты, связанные с уменьшением относительных диаметров линз (что облегчает коррекцию aberrаций) и с возможным увеличением общего размера системы [7]. Фокусные расстояния компонентов f_1' и f_2' определены по формулам геометрической оптики [8]:

$$f_1' = \frac{\alpha\beta d}{(\beta - 1)(a - d)},$$

$$f_2' = \frac{(a - d)d}{(1 - \beta)a}.$$

Основные характеристики оптической системы телескопических очков: $\beta = 3^{\times}$; $a = 350$ мм; $d = 30$ мм; $f_1' = 41,45$ мм; $f_2' = -16,29$ мм.

Оптическая система очков включает в себя положительные и отрицательные элементы. Для минимизации хроматических aberrаций материалы компонентов подобраны таким образом, чтобы коэффициенты дисперсии как можно более отличались друг от друга. Кроме того, значение числа Аббе положительного компонента должно быть выше, чем отрицательного [9, 10].

В результате анализа номенклатуры современных оптических полимеров, определены соответствующие материалы для применения в системе телескопических очков. Конечная оптическая система имеет следующие параметры: первый компонент представляет собой пару положительных линз из циклоолефинового полимера

E48R ($n_e = 1,531$, $v_e = 56$) коммерческой марки Zeonex¹; второй компонент — отрицательная линза из специализированного офтальмологического материала MR-174 ($n_e = 1,743$, $v_e = 32$)². В табл. 3 приведены конструктивные параметры предложенной оптической системы, при $\beta = 1,9^{\times}$, $2\omega' = 7^{\circ}$, $f_1' = 40,63$ мм, $f_2' = -24,10$ мм.

Оптимизация оптической системы позволила исправить монохроматические aberrации (сферические, кому, кривизну изображения, дисторсию и астигматизм). Благодаря малой апертуре оптической системы ($A = 0,01$), остаточные монохроматические осевые aberrации незначительны, качество изображения определяется размером дифракционного кружка (рис. 2). При полученном линейном увеличении угловой размер пятна рассеяния в центре поля изображения равен 0,12 угл. мин., на краю поля изображения — 4,1 угл. мин., для спектрального диапазона $\Delta\lambda = 0,480-0,633$ мкм, что не превышает допустимые значения углового предела разрешения глаза, соответствующего $1'$ для центра поля, и $5'$ — для края поля изображения.

По величине остаточного хроматизма и дифракционному размеру пятна рассеяния полученная оптическая система не уступает аналогам, выполненным из стекла [11] и комбинации стекло-полимер [7], что подтверждает ее качество и конкурентоспособность. Использование полимерных линз позволяет добиться снижения массогабаритных характеристик и облегчить работу оператора при длительном ношении очков.

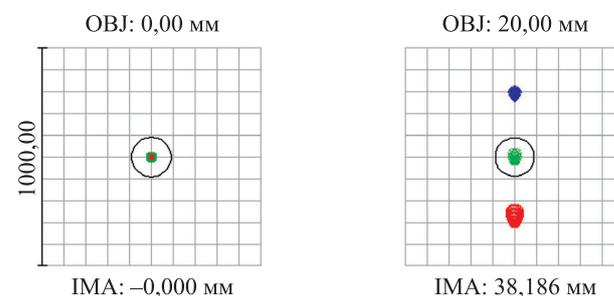


Рис. 2. Диаграмма пятна рассеяния

¹ Zeonex [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.zeonex.com>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 25.09.2020).

² Mitsui Chemicals Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://jp.mitsuichemicals.com>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 25.09.2020).

Таблица 3. Основные характеристики оптической системы телескопических очков

Номер поверхности	Радиус кривизны, мм	Осевое расстояние, мм	Материал	Показатель преломления	Коэффициент асферики
1	39,61	2,55	E48R	1,531	—
2	85,13	0,09	Воздух	1	—
3	28,10	4,68	E48R	1,531	—
4	373,93	14,63	Воздух	1	—
5	-62,67	3,57	MR-174	1,743	-10,416
6	25,95	—	—	—	1,030

Заключение

Современные оптические полимерные материалы активно используются для модернизации существующих приборов с целью улучшения их физических и эксплуатационных свойств. Высокотехнологичная и относительно недорогая полимерная оптика является перспективным средством решения технических за-

дач, связанных с уменьшением трудоемкости сборки, улучшением конструкции и надежности различных оптических систем. На примере расчета телескопических очков представлена реализация полностью полимерной оптической системы, отличающейся дифракционным качеством изображения, малым весом и компактностью.

Литература

1. Серова В.Н. Полимерные оптические материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 384 с.
2. Altman R.M., Lytle J.D. Optical-design techniques for polymer optics // *Proceedings of SPIE*. 1980. V. 237. P. 380–385. doi: 10.1117/12.959105
3. Teysier C., Tribastone C. Plastic optics: challenging the high-volume myth // *Lasers & Optronics*. 1990. V. 9. N 12.
4. 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. 373–379. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379
5. Носов П.А., Ширанков А.Ф., Третьяков Р.С., Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я. Нагрев оптических элементов из высокочистых кварцевых стекол излучением мощных волоконных лазеров // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 12. С. 1028–1033. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-12-1028-1033
6. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. 15 Volume Set. 4th ed. / ed. by F.M. Herman. NJ: Wiley, 2014. 334 p.
7. Екименкова А.С., Андреев Л.Н., Вознесенская А.О., Бахолдин А.В., Васильев В.Н. Принципы разработки операционных гибридных очков // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 12. С. 49–52. doi: 10.17586/1023-5086-2019-86-12-49-52
8. Русинов М.М. *Техническая оптика: учеб. пособие для вузов*. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. 488 с.
9. Андреев Л.Н. *Прикладная теория аббераций*. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. 52 с.
10. Чуриловский В.Н. *Теория хроматизма и аббераций третьего порядка*. Л.: Машиностроение, 1968. 310 с.
11. Ежова В.В., Андреев Л.Н. Операционные медицинские очки // *Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых*. 2016. С. 148–151.

Авторы

Екименкова Алиса Сергеевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-5847-7918, asekimenkova@itmo.ru

Вознесенская Анна Олеговна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-4074-4341, voznesenskaya@itmo.ru

Точилина Татьяна Вячеславовна — кандидат технических наук, старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6505787608, ORCID: 0000-0003-4173-8864, tvtochilina@itmo.ru

References

1. Serova V.N. *Polymer Optical Materials*. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tehnologii Publ., 2011, 384 p. (in Russian)
2. Altman R.M., Lytle J.D. Optical-design techniques for polymer optics. *Proceedings of SPIE*, 1980, vol. 237, pp. 380–385. doi: 10.1117/12.959105
3. Teysier C., Tribastone C. Plastic optics: challenging the high-volume myth. *Lasers & Optronics*, 1990, vol. 9, no. 12.
4. 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. 373–379. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-373-379
5. Nosov P.A., Shirankov A.F., Tret'yakov R.S., Grigoryants A.G., Stavertiy A.Ya. Heating of optical elements made of high-purity quartz glasses by radiation from powerful fiber laser. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 12, pp. 1028–1033. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-12-1028-1033
6. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. 15 Volume Set. 4th ed. Ed. by F.M. Herman. NJ: Wiley, 2014, 334 p.
7. Ekimenkova A.S., Andreev L.N., Voznesenskaya A.O., Bakholdin A.V., Vasil'ev V.N. Principles for developing hybrid surgical eyeglasses. *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, no. 12, pp. 786–788. doi: 10.1364/JOT.86.000786
8. Rusinov M.M. *Optical Engineering*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, 488 p. (in Russian)
9. Andreev L.N. *Applied Aberration Theory*. St. Petersburg, ITMO, 2002, 52 p. (in Russian)
10. Churilovskii V.N. *Theory of Chromatism and Third-Order Aberrations*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1968, 310 p. (in Russian)
11. Ezhova V.V., Andreev L.N. Operating Medical Glasses. *Proc. V Conference of Young Scientists*, 2016, pp. 148–151. (in Russian)

Authors

Alisa S. Ekimenkova — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-5847-7918, asekimenkova@itmo.ru

Anna O. Voznesenskaya — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-4074-4341, voznesenskaya@itmo.ru

Tatiana V. Tochilina — PhD, Senior Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6505787608, ORCID: 0000-0003-4173-8864, tvtochilina@itmo.ru