

УДК 771.351.7

Компактный объектив перископического типа на основе клиновидных призм с поверхностями свободной формы

© 2021 г. **Г. И. Грейсух***, доктор техн. наук; **Е. Г. Ежов***, доктор физ.-мат. наук;
И. А. Левин**, канд. физ.-мат. наук; **С. В. Казин***, канд. физ.-мат. наук

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

**ПАО "Красногорский механический завод им. С.А. Зверева", Красногорск

E-mail: grey@pguas.ru, subscribing_2002@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-10-03-10

Рассмотрены особенности компоновки оптической схемы объектива перископического типа на основе клиновидных призм с поверхностями свободной формы. Даны рекомендации по коррекции аберраций исходной оптической системы и контролю углов падения лучей на поверхности призм там, где зоны отражения и преломления лучей перекрываются. Эффективность данных рекомендаций продемонстрирована результатами расчёта компактного объектива перископического типа, предназначенного для работы в спектральном интервале, охватывающем видимый и ближний инфракрасный диапазоны. Элементы оптической схемы объектива выполнены из технологичных и коммерчески доступных марок пластмасс.

Ключевые слова: объектив перископического типа, клиновидная призма, поверхность свободной формы, коррекция аберраций.

Коды OCIS: 110.0110, 220.0220.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование оптики компактных систем фото- и видеосъёмки требует сохранения высокого качества изображения не только в дневное время суток, но и при сумеречном освещении, что вынуждает производителей, с одной стороны, увеличивать светосилу разрабатываемых объективов, а с другой — расширять рабочий спектральный диапазон. В совокупности со стремлением к улучшению массогабаритных характеристик данные факторы приводят к усложнению оптических схем объективов за счёт применения элементов с асферической формой преломляющих поверхностей, а также дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1–6]. Однако для мобильных устройств, осуществляющих не только фото-

и видеосъёмку, но и отображение полученной информации на экране дисплея (например, таких как ноутбуки, планшеты, смартфоны и др.), ввиду стремления к минимизации в первую очередь продольного габарита оптического тракта, использование асферических линз и ДОЭ становится недостаточным. Это требует пересмотра методов компоновки оптических схем объективов для таких трактов. Перспективным представляется, в частности, переход к перископическому типу расположения элементов схемы объектива [7, 8]. При этом наиболее эффективной видится компоновка на основе клиновидных призм с оптическими поверхностями свободной формы, применение которых уже получило широкое распространение в системах для нашиваемых дисплеев [9–12].

Высокая геометрическая точность и качество оптических деталей с поверхностями свободной формы в сочетании с низкой стоимостью их производства могут быть достигнуты только современными методами формообразования [13–16], предполагающими изготовления деталей из материалов, допускающих прецизионную штамповку и, в частности, из оптических пластмасс. При этом расширение в последние годы номенклатуры оптических пластиков [17] позволяет более эффективно корректировать как монохроматические, так и хроматические аберрации.

Исходя из выше изложенного, целью настоящей статьи является демонстрация эффективности компоновки схемного решения на основе клиновидных призм с поверхностями свободной формы, предназначенного для работы в расширенном спектральном диапазоне и ориентированного на технологичные и коммерчески доступные оптические пластмассы.

КОМПОНОВКА ИСХОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

В работе [12] представлены граничные условия на компоновку и этапы расчёта оптической системы нашлемного дисплея, в которой клиновидная призма с оптическими поверхностями свободной формы выступала в качестве окуляра. Полученные характеристики качества изображения, в частности, разрешающая способность и величина дисторсии, являются вполне удовлетворительными для окулярных систем. Однако в случае объектива потенциальные возможности однокомпонентной схемы оказываются недостаточными. Кроме того, значительный угол между плоскостями выходного зрачка окуляра и микродисплея не позволяет уменьшить продольный габарит системы до приемлемого уровня.

В патенте [18] приведена оптическая схема объектива, скомпонованная из двух клиновидных призм с оптическими поверхностями свободной формы. Исходя из требования минимизации продольного габарита системы, в представленной схеме изменена геометрия клиновидных призм с целью достижения параллельности предметной плоскости и плоскости приёмника излучения. Данная схема может служить наглядным примером реализации объектива перископического типа на

клиновидных призмах с поверхностями свободной формы. Однако достигнутая разрешающая способность, имеющая значительную неравномерность по полю, и дисторсия, превышающая десять процентов, не позволяют в полной мере оценить потенциальные возможности предложенной компоновки. При этом несомненно положительным является тот факт, что ход главных лучей в пространстве предметов в случае окуляра для системы нашлемного дисплея и в пространстве изображения в случае объектива мобильного устройства практически телецентричен, и это исключает падение освещённости в краевых зонах.

Опираясь на результаты, представленные в процитированном патенте, рассмотрим ряд особенностей компоновки оптической схемы объектива перископического типа на основе клиновидных призм. На начальном этапе клиновидные призмы можно ограничить внеосевыми сферическими поверхностями. Расчёт параксиальных характеристик и аберраций оптической системы с внеосевыми элементами позволяет произвести одна из методик, представленных в работах [19–22]. Особое внимание следует уделить коррекции аберраций узких наклонных пучков, а именно астигматизма и кривизны поля изображения. Условие устранения астигматизма можно представить в следующем виде [19]:

$$s'_j - t'_j = 0, \quad (1)$$

$$s'_j = n'_j / \left(\frac{n_j}{s_j} + \frac{n'_j \cos i'_j - n_j \cos i_j}{r_j} \right), \quad (2)$$

$$t'_j = n'_j \cos^2 i'_j / \left(\frac{n_j \cos^2 i_j}{t_j} + \frac{n'_j \cos i'_j - n_j \cos i_j}{r_j} \right), \quad (3)$$

где s_j , s'_j и t_j , t'_j — передний и задний отрезки для j -ой оптической поверхности в сагиттальной и меридиональной плоскостях, соответственно; n_j , n'_j — показатели преломления перед и после j -ой оптической поверхности; i_j , i'_j — углы падения и преломления на j -ой оптической поверхности; r_j — радиус кривизны j -ой оптической поверхности (оптическая поверхность с индексом $j = J$ является последней, при этом уравнение (1) станет условием устранения астигматизма объектива в целом).

Коррекция кривизны поля изображения в первом приближении сводится к выполнению условия Петцваля [23].

$$\sum_{j=1}^J \frac{1}{r_j} \left(\frac{1}{n'_j} - \frac{1}{n_j} \right) = 0. \quad (4)$$

Что касается аберраций широких пучков и в особенности комы, то коррекционного баланса добиваются путём соответствующего подбора углов наклона оптических поверхностей клиновидных призм [18].

Стремление минимизировать продольный габарит объектива, как правило, приводит к частичному перекрытию зон отражения и преломления лучей на поверхностях клиновидных призм. Избежать при этом потерь энергии позволяет выполнение условия полного внутреннего отражения [23].

$$\sin i > 1/n, \quad (5)$$

где i — угол падения луча на границу раздела клиновидная призма – воздух, n — показатель преломления материала клиновидной призмы.

Облегчить контроль выполнения условия полного внутреннего отражения в области перекрытия зон отражения и преломления лучей на поверхностях как первой, так и второй призм, можно, если учесть, что уравнения поверхностей, в областях перекрытия указанных зон, должны иметь хотя бы одну плоскость симметрии и не иметь точек экстремума за исключением точек в вершинах поверхностей.

Выполнение этих требований позволяет ограничиться контролем углов падения только для двух лучей (рис. 1), для которых должна выполняться следующая система неравенств:

$$\begin{cases} \sin i_1 > 1/n_1 \\ \sin i_2 > 1/n_2 \end{cases}. \quad (6)$$

Таким образом, использование формул (1)–(4) и соответствующий выбор углов наклона оптических поверхностей клиновидных призм позволяют на этапе параксиального расчёта получить конструктивные параметры начальной схемы, которые в качестве нуле-

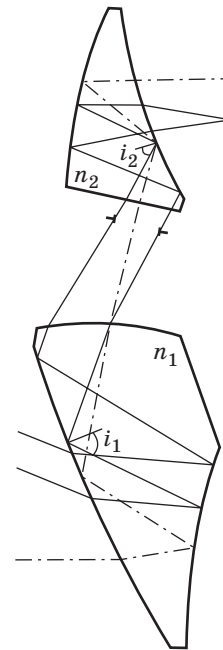


Рис. 1. Контроль выполнения условия полного внутреннего отражения в двухкомпонентной оптической схеме объектива.

вого решения, обеспечат надлежащую сходимость последующего оптимизационного процесса.

В процессе оптимизации объектива, скомпонованного с учётом выше изложенных требований, переход от сферической формы поверхностей клиновидных призм к поверхностям свободной формы целесообразно производить поэтапно, например, аналогично процедуре, описанной в работе [10]. При этом с целью коррекции остаточных аберраций широких пучков, у оптических поверхностей вблизи апертурной диафрагмы лучше сохранить вращательную симметрию.

Что касается хроматизма, то при рассмотренной компоновке объектива он определяется оптической силой четырёх преломляющих поверхностей. Поэтому их следует использовать в качестве коррекционных, перенеся оптическую силу на только отражающие поверхности, не вносящие хроматических аберраций. В качестве оптических материалов клиновидных призм логично выбрать кроноподобные пластики, а с целью минимизации вторичного спектра ввести в воздушный промежуток между этими призмами корректирующий дуплет линз из флинтоподобного пластика. Это, кроме того, упростит задачу

увеличения светосилы объектива. В качестве оптических поверхностей вблизи апертурной диафрагмы, в том числе и линз корректирующего дублета, целесообразно выбрать чётные асферические поверхности компьютерной программы оптического проектирования ZEMAX [24]. Уравнение такой поверхности имеет вид

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{p=2}^P \alpha_p \rho^{2p}, \quad (7)$$

где c — кривизна поверхности при вершине, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ — радиальная координата, k — коническая постоянная, α_p — коэффициенты асферической деформации.

В качестве поверхностей свободной формы удобно использовать поверхности, называемые в ZEMAX полиномиальными поверхностями с расширением. Соответствующий им полином имеет вид

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4xy + A_5y^2 + \dots, \quad (8)$$

где A_p — коэффициенты асферической деформации.

При требовании симметрии такой поверхности относительно выбранной плоскости коэффициенты асферической деформации при нечётных степенях соответствующих координат обнуляются. Нежелательные точки экстремума поверхности исключаются благодаря ненулевым значениям первых частных производных уравнения (8) по координатам x или y соответственно.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНОГО ОБЪЕКТИВА ПЕРИСКОПИЧЕСКОГО ТИПА

Финальный этап оптимизации проводился в компьютерной программе оптического проектирования ZEMAX. Рабочий спектральный диапазон был ограничен длинами волн $\lambda_{\min} = 0,435$ мкм и $\lambda_{\max} = 0,9$ мкм, что соответствует режиму работы «день–ночь». В качестве значений основных параметров объек-

тива были приняты следующие: заднее фокусное расстояние $f' = 4,16$ мм, относительное отверстие 1:2,4, угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 60^\circ$.

На рис. 2 представлена оптическая схема объектива перископического типа, оптимизированного с учётом представленных выше требований компоновки, а в табл. 1 и 2 его конструктивные параметры. Кроноподобные оптические пластики E48R ($n_d = 1,531160$, $v_d = 56,0438$) и PMMA ($n_d = 1,491756$, $v_d = 57,4408$) табл. 1 содержатся в каталогах ZEON и MISC программы оптического проектирования ZEMAX. Флинтоподобный оптический пластик этой таблицы EP9000 ($n_d = 1,671371$, $v_d = 19,2449$) выпускается фирмой MITSUBISHI GAS CHEMICAL под торговой маркой Lupizeta™ EP9000 [17].

Минимальное значение углов падения лучей на поверхность свободной формы в область перекрытия зон отражения и преломления лучей для первой и второй призм равно $45,40^\circ$ и $42,22^\circ$ соответственно. При этом граничные значения углов полного внутреннего отражения для первой и второй призм составляют $40,90^\circ$ и $42,20^\circ$ соответственно. Модуль дисторсии рассчитанного объектива не превышает 4,5%. Величина вторичного спектра менее

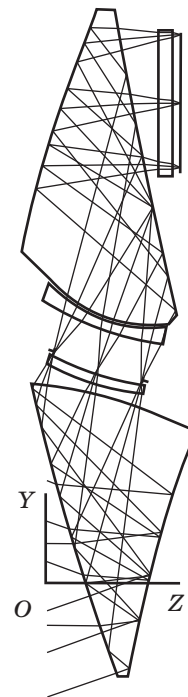


Рис. 2. Оптическая схема компактного объектива перископического типа.

13,5 мкм, в то время как при относительном отверстии 1:2,4 и в отсутствии других аберраций полихроматическое изображение остаётся ещё дифракционно-ограниченным, если вторичный спектр не превышает 13,7 мкм.

Контраст по всему полю изображения на пространственных частотах $N \leq 100 \text{ мм}^{-1}$ не падает ниже 0,55, а на частотах $N \leq 200 \text{ мм}^{-1}$ не падает ниже 0,29 (рис. 3). При этом габаритные размеры объектива составляют 3,3×5,4×13,1 мм,

Таблица 1. Конструктивные параметры: типы поверхностей, их расположение в пространстве и материалы элементов

№ поверхности по ходу луча	Тип поверхности	y_t , мм	z_t , мм	Θ°	Материал
Объект	—	—	$-\infty$	—	—
1	ПСФ(1)*	1,8411	0,2500	-16,6285	
2	ПСФ(2)	1,1668	2,5334	18,6494	E48R [24]
3	ПСФ(1)	1,8411	0,2500	-16,6285	
4	АП(1)**	3,8579	1,1532	-77,1069	Воздух
5	АП(2)	4,0890	1,0255	-74,5601	EP9000 [17]
6	АП(3)	4,2818	1,0787	-74,5601	Воздух
7	АД***	4,3779	1,1053	-74,5601	Воздух
8	АП(4)	5,1955	1,1737	-71,0535	EP9000[17]
9	АП(5)	5,3847	1,2386	-71,0535	Воздух
10	АП(6)	5,4414	1,2581	-71,0535	
11	ПСФ(3)	7,1346	2,4479	-13,1755	PMMA [24]
12	ПСФ(4)	8,4648	-0,1044	16,3856	
13	ПСФ(3)	7,1346	2,4479	-13,1755	Воздух
14	ЗС(1)****	9,7463	2,4403	0	PMMA [24]
15	ЗС(2)	9,7463	2,7403	0	Воздух
Изображение	—	9,7463	2,9403	0	—

* поверхность свободной формы.

** асферическая поверхность с вращательной симметрией.

*** апертурная диафрагма.

**** поверхность защитного стекла.

Примечание. В табл. 1 y_t, z_t — координаты вершины кривой стрелки прогиба поверхности в плоскости YOZ системы координат, представленной на рис. 2; Θ — угол наклона кривой стрелки прогиба поверхности в плоскости YOZ относительно оси, проходящей через её вершину.

Таблица 2. Конструктивные параметры поверхностей

Параметр	Асферическая поверхность с вращательной симметрией					
	АП(1)	АП(2)	АП(3)	АП(4)	АП(5)	АП(6)
$c, \text{мм}^{-1}$	-0,12703	0,22824	0,19933	0,16625	0,36072	0,35810
k	0	0	0	0		0
$a_2 \times 10^3, \text{мм}^{-3}$	5,41903	-25,47967	-42,19881	-11,92930	-27,50460	-27,46700
$a_3 \times 10^3, \text{мм}^{-5}$	0,82681	-15,06478	-4,47643	3,54536	12,90129	12,97266
$a_4 \times 10^3, \text{мм}^{-7}$	-0,66289	6,80864	-2,60204	-1,49174	-5,97288	-6,03141
$a_5 \times 10^3, \text{мм}^{-9}$	0,17224	0,65407	4,57566	0,48030	1,28105	1,13445

Окончание табл. 2

Параметр	Поверхность свободной формы			
	ПСФ(1)	ПСФ(2)	ПСФ(3)	ПСФ(4)
$c, \text{мм}^{-1}$	0	0	0	0
k	0	0	0	0
$A_3 \times 10^3, \text{мм}^{-1}$	12,38762	8,60534	26,94460	52,89765
$A_5 \times 10^3, \text{мм}^{-1}$	11,29043	20,41139	1,55887	22,53228
$A_7 \times 10^4, \text{мм}^{-2}$	-9,37603	-10,11344	10,14892	49,52865
$A_9 \times 10^5, \text{мм}^{-2}$	-57,96588	-131,80468	-0,08259	227,73902
$A_{10} \times 10^5, \text{мм}^{-3}$	-8,74681	-0,18410	-13,39338	-3,316905
$A_{12} \times 10^5, \text{мм}^{-3}$	7,71675	0,40821	-9,55562	-91,56522
$A_{14} \times 10^5, \text{мм}^{-3}$	8,62833	-9,36665	3,86388	-79,04434
$A_{16} \times 10^5, \text{мм}^{-4}$	1,89090	-0,37997	3,83378	14,28733
$A_{18} \times 10^5, \text{мм}^{-4}$	-0,95224	-11,87442	8,39492	20,19251
$A_{20} \times 10^5, \text{мм}^{-4}$	-1,06458	-14,74082	2,44444	12,20529

Примечание. Коэффициенты асферической деформации уравнений (7) и (8), не вошедшие в табл. 2, равны нулю.

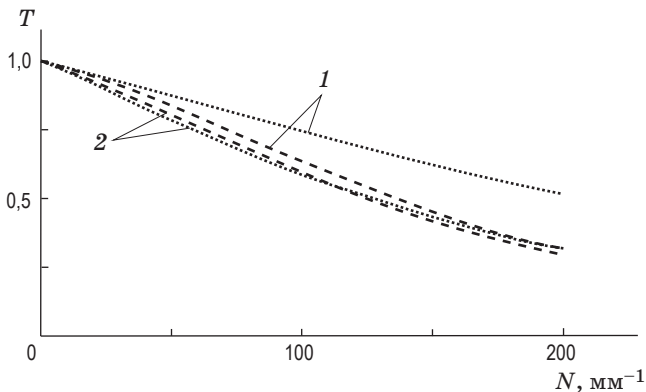


Рис. 3. Дифракционная полихроматическая частотно-контрастная характеристика компактного объектива перископического типа. 1 — $\omega = 0^\circ$, 2 — $\omega = 30^\circ$ (..... — сагиттальная, --- — меридиональная).

где 3,3 мм — продольный габарит системы. Для сравнения представленный в работе [25] объектив с сопоставимыми оптическими характеристиками, скомпонованный по классической схеме, имеет продольный габарит 4,8 мм, что в 1,45 раза больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности компоновки оптической схемы объектива перископического

типа на основе клиновидных призм с поверхностями свободной формы. В частности, даны рекомендации по коррекции аберраций исходной оптической системы и контролю углов падения лучей на поверхности призм там, где зоны отражения и преломления лучей перекрываются. Отмечена целесообразность поэтапного перехода от сферических поверхностей к поверхностям свободной формы у клиновидных призм исходной оптической схемы.

Эффективность приведённых рекомендаций продемонстрирована результатами расчёта компактного объектива перископического типа, работающего в расширенном спектральном диапазоне (от 0,435 мкм до 0,9 мкм), соответствующем режиму «день-ночь», с фокусным расстоянием $f' = 4,16$ мм, диафрагменным числом 2,4 и угловым полем зрения $2\omega = 60^\circ$. Контраст по всему полю изображения на пространственных частотах $N \leq 200 \text{ мм}^{-1}$ не падает ниже 0,29. При этом продольный габарит системы не превышает 3,3 мм, что практически в 1,45 раза меньше, чем у аналогичных систем, скомпонованных по классической схеме. При этом минимальное значение углов падения лучей на поверхность свободной формы в область перекрытия зон отражения и преломления лучей для первой и второй призм равно $45,40^\circ$ и $42,22^\circ$ соот-

ветственно, что больше граничных значений углов полного внутреннего отражения для использованных оптических пластиков.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bureau J., Clark P.P.* The optics of miniature digital camera modules // *Proceedings of SPIE*. 2006. V. 6342. P. 63421F-1 – 63421F-11.
2. *Бронштейн И.Г., Зверев В.А., Лившиц И.Л., Kim Young-Gi, Kim Tae-Young, Jung Phil-Но.* Выбор оптической схемы и расчет малогабаритных объективов для мобильных телефонов // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 5. С. 25–31.
3. *Steinich T., Blahnik V.* Optical design of camera optics for mobile phones // *Advanced Optical Technologies*. 2012. V. 1. № 1–2. P. 51–58.
4. *Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A.* Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives // *Applied Optics*. 2010. V. 49. № 23. P. 4379–4384.
5. *Грейсукх Г.И., Ежов Е.Г., Левин И.А., Степанов С.А.* Расчет пластмассово-линзовых микрообъективов суперахроматов // *Компьютерная оптика*. 2011. Т. 35. № 4. С. 473–479.
6. *Грейсукх Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А.* Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств // *Компьютерная оптика*. 2017. Т. 41. № 2. С. 218–226.
7. *Wen-Shing Sun, Chuen-Lin Tien, Jui-Wen Pan, Yu-Hao Chao, Pu-Yi Chu.* Optimization design of periscope type 3X zoom lens design for a five megapixel cellphone camera // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 10150. P. 1015005-1 – 1015005-6.
8. *Грейсукх Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А.* Компоновка и расчёт рефракционно-дифракционного объектива перископического типа для мобильного устройства связи // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 11. С. 51–57.
9. *Hiroaki Hoshi, Naosato Taniguchi, Hideki Morishima, Takeshi Akiyama, Shouichi Yamazaki, Atsushi Okuyama.* Off-axial HMD optical system consisting of aspherical surfaces without rotational symmetry // *Proceedings of SPIE*. 1996. V. 2653. P. 234–242.
10. *Zhenfeng Zhuang, Qijia Cheng, Phil Surman, Yuanjin Zheng, Xiao Wei Sun.* A compact and lightweight off-axis lightguide prism in near to eye display // *Optics Communications*. 2017. V. 393. P. 143–151.
11. *Dewen Cheng, Yongtian Wang, Hong Hua, Jose Sasian.* Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling // *Optics Letters*. 2011. V. 36. № 11. P. 2098–2100.
12. *Dewen Cheng, Yongtian Wang, Hong Hua, Talha M.M.* Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism // *Applied Optics*. 2009. V. 48. № 14. P. 2655–2668.
13. *Fang F.Z., Zhang X.D., Weckenmann A., Zhang G.X., Evans C.* Manufacturing and measurement of freeform optics // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2013. V. 62. № 2. P. 823–846.
14. *Dick L., Risse S., Tünnermann A.* Injection molded high precision freeform optics for high volume applications // *Advanced Optical Technologies*. 2012. V. 1. № 1–2. P. 39–50.
15. *Hiroshi Owari, Shinsuke Kawai, Yukihiko Mukai, Shigekazu Terada, Takeshi Matsuo, Masafumi Seigo, Akihiro Yano, Tadaomi Imura, Daisuke Emi, Seiichiro Kitagawa.* Technology development of mold fabrication for free-form surface, DOE and microlens // *Proceedings of SPIE*. 2006. V. 6110. P. 61100T-1 – 61100T-10.
16. *Blalock T., Medicus K., DeGroot J.* Nelson fabrication of freeform optics // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9575. P. 95750H-1 – 95750H-10.
17. MITSUBISHI GAS CHEMICAL [Электронный ресурс]. URL: http://www.mgc.co.jp/eng/products/kc/iupizeta_ep.html.
18. *Aoki N., Togino T., Tamagawa A.* Image-forming optical system and apparatus using the same // *Patent U.S.* 6,084,715 G02B 27/10, G02B 27/14 359/627. 2000.
19. *Yi Zhong, Herbert Gross.* Initial system design method for nonrotationally symmetric systems based on Gaussian brackets and Nodal aberration theory // *Optics Express*. 2017. V. 25. № 9. P. 10016–10030.
20. *Keisuke Araki.* Paraxial analysis of off-axial optical systems // *Japanese Journal of Optics (Kogaku)*. 2000. V. 29. № 3. P. 156–163 (in Japanese).

21. *Keisuke Araki*. Paraxial and aberration analysis of off-axial optical systems // *Optical Review*. 2005. V. 12. № 3. P. 219–222.
22. *Akiyama Takeshi, Araki Keisuke*. Optical system // Patent E.P. 0 977 067 A2 G02B 13/00. 2000.
23. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с. (M. Born Principles of Optics, 4th ed. Pergamon Press. N.Y., 1968).
24. ZEMAX: Optical, illumination, and laser system design software. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zemax.com/products/opticstudio>.
25. *Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Левин И.А., Степанов С.А.* Дифракционные элементы в оптических системах: успехи, проблемы и пути их решения // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2014. Т. 57. № 8–9. С. 683–692.