

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-82-94

УДК 681.7.028, 681.7.067.2

Технология создания крупногабаритного линзового объектива для инфракрасной области спектра из оптических кристаллов

Владимир Иванович Вензель¹✉, Игорь Юрьевич Дмитриев²,
Елена Станиславовна Муравьева³, Андрей Александрович Семёнов⁴

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор
Ленинградской обл., Россия

¹venzelvi@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>

²dmitrieviy@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>

³muravyevaes@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-4544-4110>

⁴semenovaa@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>

Аннотация

Предмет исследования. Прогнозирование качества изображения крупногабаритного широкоугольного высокоапертурного линзового объектива для инфракрасной области спектра из оптических кристаллов, методы оптимизации его конструкции, сборки и юстировки. **Цель работы.** Разработка конструкции объектива, учитывающей влияние оптической однородности, расчетных и технологических допусков формы поверхностей и децентрировки линз на качество изображения и возможность компенсации остаточных aberrаций при сборке и юстировке. **Метод** включает в себя выбор критерия качества изображения и расчет его допустимого снижения, распределение отклонения волнового фронта объектива между погрешностями, вызванными оптической неоднородностью материалов, децентрировкой линз и отклонением формы поверхностей, оценку неоднородности материалов с учетом формы поверхностей и хода лучей в линзах, исследование возможностей схемы объектива с целью компенсации остаточных aberrаций, обоснование выбора конструкции объектива с минимальным количеством юстировочных подвижек линз. **Основные результаты.** Сформулированы критерии при выборе допусков на оптическую однородность материалов. Показана возможность создания высокотехнологичной насыпной конструкции шестилинзового объектива из оптических кристаллов, изготовленного по существующим технологиям. **Практическая значимость.** Предлагаемые технические решения были апробированы при создании высокоразрешающих объективов для оптико-электронной системы дистанционного зондирования Земли из космоса.

Ключевые слова: линзовый объектив, расчетный допуск, оптическая однородность, расчетные допуски децентрировки, технологические децентрировки, сборка, юстировка, компенсация aberrаций, волновая ошибка, оптические кристаллы

Ссылка для цитирования: Вензель В.И., Дмитриев И.Ю., Муравьева Е.С., Семёнов А.А. Технология создания крупногабаритного линзового объектива для инфракрасной области спектра из оптических кристаллов // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 82–94. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-82-94>

Коды OCIS: 220.0220, 080.1005, 080.4228

Technology for developing a large-sized lens made from optical crystals for the infrared spectral range

VLADIMIR I. VENZEL¹✉, IGOR YU. DMITRIEV², ELENA S. MURAVEVA³, ANDREY A. SEMENOV⁴

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region, Russia

¹venzelvi@niiioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>

²dmitrieviy@niiioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>

³muravyevaes@niiioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-4544-4110>

⁴semenovaa@niiioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>

Abstract

Subject of the study. Image quality forecasting of a large-sized wide-angle and high-aperture lens for the infrared spectral range made of optical crystals, methods for optimizing its design, assembly and alignment. **The aim of the work** is to create a high-tech lens design considering the effects of the optical materials homogeneity, of design and technological tolerances for surface shape and lens decentering on the image quality and the possibility of compensating of residual aberrations during the assembly and alignment of the lens system. **The method** involves selecting the image quality criterion and calculating its acceptable reduction, distributing the wavefront error of the lens system among errors caused by the optical material inhomogeneity, lens decentering and surface form deviation, an assessment of the material homogeneity considering surface shape and ray paths in the lenses, exploring lens system configurations to compensate residual aberrations, rationale for choosing a lens design with a minimal number of lens alignment adjustments. **Key results.** Criteria for selecting tolerances for the homogeneity of the optical material are formulated. The possibility of creating a high-tech six-lens optical system of an insertable lens design with optical crystals using available materials and existing technologies is shown. **Practical significance.** The proposed technical solutions have been tested in the development of high-resolution lenses for Earth remote sensing optical-electronic systems from space.

Keywords: optical system, lens system, design tolerance, technological decentering, optical homogeneity, assembly, alignment, aberration compensation, wavefront error, optical crystals

For citation: Venzel V.I., Dmitriev I.Yu., Muraveva E.S., Semenov A.A. Technology for developing a large-sized lens made from optical crystals for the infrared spectral range [in Russian] // *Opticheskiy Zhurnal*. 2024. V. 91. № 9. P. 82–94. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-82-94>

OCIS codes: 220.0220, 080.1005, 080.4228

ВВЕДЕНИЕ

При создании оптико-электронной аппаратуры для решения задач наблюдения за мало-контрастными объектами из космоса требуются компактные светосильные высокоразрешающие объективы, обеспечивающие высокое пропускание и большое угловое поле. Анализ оптических схем зеркальных и зеркально-линзовых объективов, удовлетворяющих данным требованиям [1], показал, что при угловых полях $2\omega > 10\text{--}12^\circ$ наиболее предпочтительным является линзовый вариант.

Значительное влияние на конструктивные параметры и качество изображения линзовых объективов для инфракрасной (ИК) области спектра оказывают используемые оп-

тические материалы. Применение монокристаллов кремния и германия, обладающих высокими показателями преломления и образующих ахроматическую пару, дает возможность получить компактный объектив с минимальным количеством линз. Однако при создании относительно крупногабаритных объективов диаметром более 200 мм ограничивающим фактором, требующим учета, является низкая оптическая однородность монокристаллов, которая не нормируется ни техническими условиями (ТУ) производителей, ни действующим ГОСТом 23136-93 «Оптические материалы» [2]. За рубежом действует стандарт ISO 19740:2018 «Оптика и фотоника. Оптические материалы и ком-

поненты. Метод определения однородности оптических материалов для ИК области спектра» [3]. В стандарте используется интерферометрический метод контроля заготовок. При прогнозировании разрешения объектива и отбраковке оптических материалов авторы следовали этому стандарту.

Отсутствие нормирования оптических характеристик кристаллов вынуждает производителей оптических систем проводить входной контроль оптических характеристик заготовок материалов, в частности, наиболее важной из них — оптической однородности [4].

Поэтому наряду с традиционными проблемами при проектировании и изготовлении крупногабаритных объективов значительное внимание приходится уделять прогнозированию качества изображения объектива на этапе отбора заготовок.

В целях прогнозирования качества изображения проектируемого объектива нами использовались усредненные данные об аберрациях клиновидных заготовок (угол клина 3–7') с плоскими поверхностями, полученные при интерференционном контроле достаточно большого количества крупногабаритных заготовок из кремния и германия диаметром более 200 мм двух производителей (свыше 40 шт.).

Волновой фронт (ВФ), прошедший крупногабаритную заготовку из монокристаллов, практически всегда содержит симметричные аберрации дефокусировки и сферической аберрации различных порядков, а также асимметричные аберрации астигматизма и комы различных порядков. Некоторые из этих аберраций (симметричные 3-го порядка) можно компенсировать при пересчете объектива, изменяя межлинзовые расстояния и радиусы кривизны поверхностей линз. Влияние асимметричных аберраций 3-го порядка (астигматизм, кома) можно уменьшить за счет оптимизации разворота и центрировки линз при сборке. Невозможно компенсировать аберрации высоких порядков (местные погрешности, определяемые как среднеквадратическая сумма аберраций высоких порядков), которые и определяют предельные значения параметров разрешения объектива, связанные с влиянием материалов. В связи с этим целесообразно разделить аберрации загото-

вок на симметричные и асимметричные аберрации 3-го порядка и местные погрешности.

Требования к однородности заготовок можно снизить, если учесть изменение оптического хода в реальной линзе по отношению к оптическому ходу при контроле заготовки [4, 5]. Это связано с тем, что при изготовлении линз (особенно высокоапертурных) происходит значительный съем материала заготовок, что приводит к уменьшению аберраций. В широкоугольных объективах необходимо также учитывать коэффициент влияния аберраций линз на качество изображения объектива, который для некоторых линз может значительно отличаться от единицы.

Проблемы проектирования и изготовления линзовых объективов приведены во многих публикациях [6–15]. Большинство работ посвящены вопросам схемотехники и контроля параметров объективов [7–11], центрировке линз и допускам на децентрировку [12–14]. Технологические и конструкторские решения при создании линзовых объективов описаны в работах [6, 13, 15].

Однако в этих работах не рассмотрены вопросы определения допусков на оптическую однородность материалов и методы, позволяющие улучшить прогнозирование влияния неоднородности на качество изображения. Этой проблеме посвящена статья [16] и раздел 5.5 в книге [17]. В работе [16] отмечено, что задача пока решена для частных случаев и результат зависит от положения неоднородности в зрачке системы. В публикации [17] приведены примеры расчета влияния симметричных и асимметричных аберраций заготовок на дефокусировку и астигматизм системы.

Целью работы являлась разработка высоко-технологичной конструкции объектива, учитывающей влияние оптической однородности, расчетных и технологических допусков формы поверхностей и децентрировки линз на качество изображения и возможность компенсации остаточных аберраций при сборке и юстировке.

В настоящей работе описана методика учета оптической однородности материалов при прогнозировании качества изображения и изготовлении линзового крупногабаритного объектива, работающего в среднем ИК диапазоне спектра и содержащего линзы из оптических монокристаллов кремния и германия.

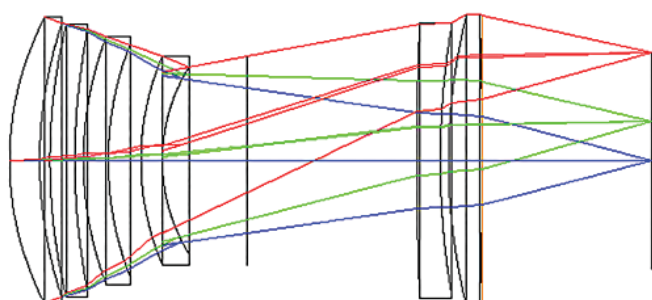


Рис. 1. Принципиальная схема линзового ИК объектива с ходом лучей

Fig. 1. The principal scheme of the infrared lens system with path of the rays

Принципиальная схема линзового ИК объектива приведена на рис. 1.

Световой диаметр объектива 300 мм, относительное отверстие 1:2. Объектив предназначен для работы с линейными приемниками. Коэффициент концентрации энергии (ККЭ) по всему полю зрения должен превышать $\delta_{EI} > 0,70$ в кружке $\varnothing 30$ мкм в спектральном диапазоне 3,5–3,9 мкм со средней длиной волны 3,7 мкм.

ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

На первом этапе проектирования необходимо определить допустимые значения параметров, влияющих на качество изображения объектива, и оценить возможность его изготовления из заготовок доступного качества по освоенным технологиям производства.

К параметрам, влияющим на качество изображения, можно отнести следующие: оптическую однородность материалов, погрешности формы поверхности линз и центрировки линз, отклонения от расчетных значений радиусов кривизны и толщины линз, межлинзовых расстояний, а также показателей преломления материалов.

Пересчет объектива по фактическим толщинам и радиусам кривизны поверхностей линз, измеренному показателю преломления материалов линз не представляет сложности. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только три первых составляющих погрешности: оптическую однородность материалов, погрешности формы поверхности и центрировки линз. Анализ, учет влияния и возможность

их коррекции проводятся на начальном этапе проектирования при выборе типа конструкции объектива и методики его сборки и юстировки.

КРИТЕРИИ ДОПУСТИМОГО СНИЖЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ОБЪЕКТИВА

Общепринятым критерием качества изображения объективов систем наблюдения мало-размерных объектов в ИК области спектра является ККЭ в кружке заданного диаметра. Для решения технологических задач удобнее использовать в качестве критерия качества изображения отклонение ВФ в рабочем диапазоне длин волн.

Основным критерием качества изображения оптической системы целесообразно выбрать среднеквадратическое отклонение (RMS^1) ВФ из-за его большой корреляции с ККЭ и возможностью суммирования составляющих общей погрешности [17].

Найдем соответствие заданного в технических требованиях критерия $\delta_{EI} = 0,7$ допустимому RMS_{tol} ВФ объектива (ВФО) на средней рабочей длине волны $\lambda_{op} = 3,7$ мкм, лежащей в рабочем диапазоне 3,5–3,9 мкм. Принцип моделирования в программе ZEMAX и деления погрешностей приведены в работах [18, 19].

Моделирование показало, что значение $\delta_{EI} = 0,7$ в кружке $\varnothing 30$ мкм по всему полю достигается при допустимой среднеквадратической деформации ВФО $RMS_{tol} = 0,22\lambda_{op}$.

Суммарная среднеквадратическая деформация ВФО от основных источников не должна превышать установленного критерия

$$RMS_{tol} = 2\sqrt{RMS_{hom}^2 + RMS_{dec}^2 + RMS_{sur}^2} = 0,22\lambda_{op},$$

где RMS_{hom} — допустимая среднеквадратическая деформация ВФО, вызванная однородностью материала линз, λ_{op} , RMS_{dec} — допустимая среднеквадратическая деформация ВФО, вызванная децентрировками линз, λ_{op} , RMS_{sur} — допустимая среднеквадратическая деформация ВФО, вызванная погрешностями поверхностей линз, λ_{op} . Коэффициент 2 введен для учета отклонения распределения ошибок от нормального закона.

¹ Root Mean Square.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ ЗАГОТОВОК ЛИНЗ

Наиболее информативным при контроле оптической однородности заготовок из ИК материалов является интерферометрический способ [3–5]. При формировании требований к однородности заготовок и прогнозировании качества линз, полученных из них, будем пользоваться усредненными результатами контроля оптической однородности крупногабаритных заготовок в виде RMS_{mat} материала и RMS_{loc} местных погрешностей на длине волны интерферометра $\lambda_{int} = 3,39$ мкм, приведенными к толщине $t = 1$ мм: для кремниевых заготовок $\varnothing 300$ мм $RMS_{mat}/t = 0,002\lambda_{int}/\text{мм}$, $RMS_{loc}/t = 0,001\lambda_{int}/\text{мм}$, для германиевых заготовок $\varnothing 220$ мм $RMS_{mat}/t = 0,009\lambda_{int}/\text{мм}$, $RMS_{loc}/t = 0,005\lambda_{int}/\text{мм}$.

В табл. 1 приведены данные среднеквадратической деформации ВФ RMS_{bl} , прошедшего заготовки, и их среднеквадратическая сумма RMS_{hom_bl} на длине волны интерферометра, результаты пересчета деформации ВФ заготовок на деформацию ВФ линз на рабочей длине волны объектива $\lambda_{op} = 3,7$ мкм с учетом светового диаметра, толщины и хода лучей в линзах на рабочей длине волны объектива и коэффициентов влияния k и k_{loc} , определяющих вклад общих RMS_{lens} и местных RMS_{loc} материала

линзы в RMS_{hom} объектива, вычисляемого по формуле

$$RMS_{hom} = \sqrt{\sum_{i=1}^6 k_i^2 RMS_{ilens}^2}.$$

Из данных табл. 1 видно, что учет хода лучей в линзах и коэффициента влияния значительно снижает прогнозируемые aberrации линз и всего объектива, вызванные оптической неоднородностью.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ЛИНЗ

При анализе будем исходить из достижимых при изготовлении крупногабаритной оптики погрешностей сферической формы поверхности $\Delta N = 0,3$, что соответствует $RMS_{sph} = 0,07\lambda_{gr} = 0,01\lambda_{op}$ ($\lambda_{gr} = 0,54$ мкм) и асферической поверхности $RMS_{asph} = 0,20\lambda_{red} = 0,034\lambda_{op}$ ($\lambda_{red} = 0,6328$ мкм). Для выделения местных погрешностей разделим погрешность изготовления поверхностей на погрешность 3-го порядка RMS_3 и местные погрешности RMS_{loc} из пропорций 4:1 для сферических поверхностей и 1:1 — для асферических, что связано с технологией их изготовления (данные авторов по значительному числу реализаций, при другой технологии

Таблица 1. Отклонения ВФ, вызванные оптической неоднородностью материала линз
Table 1. Wavefront deformations caused by optical inhomogeneity of lens material

Материал, толщина заготовки	RMS_{bl}	RMS_{loc}	№ линзы (рис. 2)	RMS_{lens}	RMS_{loc}	k	k_{loc}
1-я заготовка Si, 61 мм	0,122	0,061	1	0,025	0,010	0,955	0,965
2-я заготовка Si, 40 мм	0,08	0,04	2	0,02	0,008	0,795	0,831
3-я заготовка Si, 61 мм	0,122	0,061	3	0,009	0,004	0,521	0,582
4-я заготовка Ge, 52,4 мм	0,471	0,262	4	0,151	0,086	0,270	0,327
5-я заготовка Si, 40 мм	0,08	0,04	5	0,022	0,009	0,071	0,023
6-я заготовка Si, 37 мм	0,074	0,037	6	0,025	0,010	0,056	0,015
RMS_{hom_bl}	0,511	0,279	RMS_{hom}	0,068	0,031	—	—

Таблица 2. Влияние отклонений формы поверхностей линз на погрешность ВФО
Table 2. Influence of lenses surfaces shape deformations on wavefront error of the lens

№ поверхности	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1,0	0,9	0,83	0,75	0,59	0,53	0,35	0,35	0,24	0,23	0,22	0,20
k_{loc}	1,0	0,92	0,86	0,80	0,71	0,68	0,58	0,58	0,17	0,17	0,16	0,15

обработки поверхностей пропорции могут отличаться).

$$RMS_{sph} = \sqrt{RMS_{3sph}^2 + RMS_{loc_sph}^2} = 0,01\lambda_{op}.$$

Тогда среднеквадратическое отклонение ВФ, вызванное местными погрешностями сферических поверхностей, составляет $RMS_{loc_sph} = 0,0024\lambda_{op}$.

$$RMS_{asph} = \sqrt{RMS_{3asph}^2 + RMS_{loc_asph}^2} = 0,034\lambda_{op}.$$

Тогда среднеквадратическое отклонение ВФ, вызванное местными ошибками асферической поверхности, составляет $RMS_{loc_asph} = 0,024\lambda_{op}$.

При задании фактической формы поверхностей линз с помощью функции Zernike Fringe Sag (ZEMAX) вычисляются коэффициенты Цернике третьего и более высоких порядков и коэффициент влияния отклонения формы поверхностей на качество изображения объектива. Коэффициенты влияния полных и местных отклонений определяются как

$$k = \Delta RMS_{total} / RMS_s,$$

$$k_{loc} = \Delta RMS_{total} / RMS_{s_loc},$$

где ΔRMS_{total} — изменение отклонения ВФО, вызванное фактическими отклонениями формы поверхности, λ_{op} , RMS_s — фактические значения отклонения формы поверхности, λ_{op} , RMS_{s_loc} — фактические значения местных отклонений формы поверхности, λ_{op} .

Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Определим суммарное среднеквадратическое отклонение ВФО, вносимое погрешностями формы поверхностей RMS_{sur} , λ_{op} ,

$$RMS_{sur} = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} RMS_{is}^2 k_i^2 (n_i - 1)^2} = 0,065\lambda_{op}$$

и суммарное среднеквадратическое отклонение ВФО, вносимое местными погрешностями формы поверхностей, λ_{op} ,

$$RMS_{sur_loc} = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} RMS_{is_loc}^2 k_{i_loc}^2 (n_i - 1)^2} = 0,042\lambda_{op},$$

где n_i — номинальный показатель преломления i -ой линзы.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕЦЕНТРИРОВОК ЛИНЗ

Определим достижимые технологические децентрировки поверхностей сферических линз в оправках методом двух труб [20] с учетом их фокусировки на расстояния, отличные от положения максимальной чувствительности, асферических линз — методом с использованием штатной голограммы [21].

В табл. 3 приведены технологические и расчетные допуски на децентрировку поверхностей, а также соответствующие технологическим допускам RMS аберраций.

Определим влияние децентрировки поверхностей на RMS_{dec} ВФО

$$RMS_{dec} = \sqrt{\sum_{i=1}^{12} RMS_{idecen}^2} = 0,053\lambda_{op}.$$

КОНСТРУКЦИЯ ОБЪЕКТИВА

Для аэрокосмического объектива имеет смысл рассматривать корпусную насыпную конструкцию объектива с предварительной децентрировкой линз в оправках как наиболее стабильную и технологичную, требующую минимальных юстировочных операций при сборке.

Таблица 3. Расчетные допуски и технологическая погрешность центрировки**Table 3.** Calculated tolerances and technological errors of centering

№ поверхности	Расчетный допуск на центрировку поверхностей, мкм/с	Технологическая децентрировка поверхностей, мкм/с	Влияние на RMS_{dec}
1	±11	±16	0,02
2	±16	±14	0,012
3	±16	±24	0,024
4	±16	±22	0,024
5	±78	±15	0,005
6	±16/60	±12/4	0,017/0
7	±78	±23	0,015
8	±27	±22	0,019
9	±468	±44	0,002
10	±117	±22	0,003
11	±86	±47	0,010
12	±281	±50	0,010

Найдем среднеквадратическое значение RMS_{res} суммарных aberrаций трех составляющих — формы поверхности, децентрировки и неоднородности, и сравним их с предельным значением RMS ВФО.

Если не компенсировать aberrации 3-го порядка при юстировке, то RMS ВФ системы в центре поля зрения на рабочей длине волны будет составлять

$$RMS_{res} = 2\sqrt{RMS_{hom}^2 + RMS_{dec}^2 + RMS_{sur}^2} = 2\sqrt{0,068^2 + 0,053^2 + 0,065^2} = 0,216\lambda_{op},$$

что укладывается в допуск $RMS_{tol} = 0,22\lambda_{op}$.

Если компенсировать aberrации 3-го порядка юстировкой, то RMS системы в центре поля зрения на рабочей длине волны будет составлять

$$RMS_{res_loc} = 2\sqrt{RMS_{hom_loc}^2 + RMS_{sur_loc}^2} = 2\sqrt{0,031^2 + 0,042^2} = 0,104\lambda_{op}.$$

Приведенный анализ основных составляющих отклонений ВФО показывает, что создание объектива с заданными параметрами насыпной конструкции с центрировкой линз в оправе возможно с использованием существующих материалов и оптических технологий. Более того, есть возможность расширить допуски на форму поверхностей линз и их центрировку, учитывая последующие компенсации aberrаций 3-го порядка при сборке и юстировке.

В связи с малым влиянием допуски на форму поверхностей линз 5, 6 (рис. 2) могут быть расширены до $\Delta N = 1$. Допуски на выпуклые поверхности линз 3, 4 (рис. 2) также могут быть расширены до $\Delta N = 0,6$.

Из допусков на децентрировку наиболее проблемными являются допуски на децентрировку линзы с асферической поверхностью, которые должны быть выдержаны при

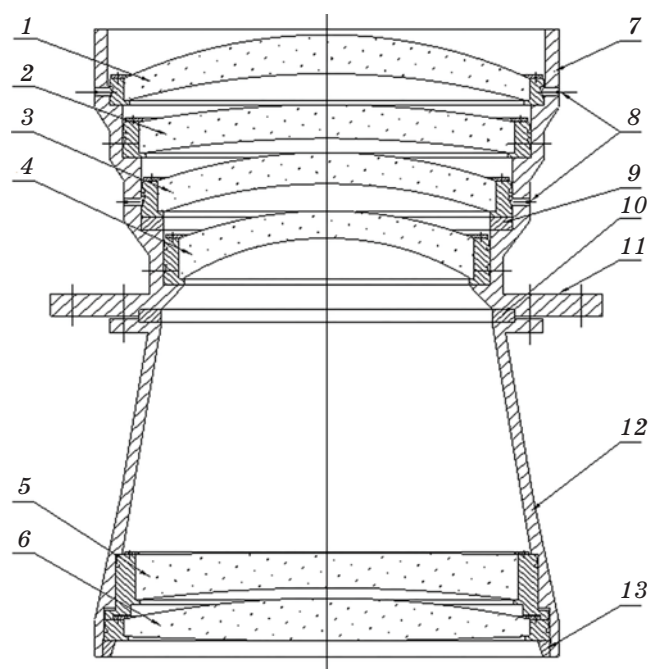


Рис. 2. Конструкция объектива. 1–6 — линзы в оправе, 7 — первый полукорпус, 8 — юстировочные винты, 9 — промежуточное кольцо, 10 — межкорпусное промежуточное кольцо, 11 — посадочный фланец, 12 — второй полукорпус, 13 — прижимное кольцо

Fig. 2. The construction of the lens. (1–6) Lenses in mounts, (7) first semi-barrel, (8) adjustment screws, (9) intermediate ring, (10) interjacent intermediate ring, (11) mounting flange, (12) second semi-barrel, (13) clamping ring

обработке поверхностей. Технология изготовления линз с асферической поверхностью, выполненной методом малоразмерного инструмента, приведена в работе [22].

Существует также множество более мелких источников погрешностей, которые не учитывались в предварительных расчетах. Например, торцевое биение опорных поясков линз, изменение формы линз при креплении в оправе и при креплении оправ в корпусе, погрешности измерения направления осей и размаха астигматизма и комы поверхностей. Сюда же можно отнести распределение зазоров между оправами и корпусом. Наличие таких погрешностей приводит к остаточным aberrациям объектива типа комы и астигматизма 3-го порядка, которые можно компенсировать поперечными подвижками линз.

Возможность компенсации остаточных комы ΔC и астигматизма ΔA 3-го порядка иллюстрируется табл. 4.

Анализируя результаты расчета влияния децентрировок (табл. 4), можно сделать вывод, что конструкция объектива для компенсации комы в центре поля зрения должна содержать поперечные линейные подвижки линзы 3 (рис. 2) из-за малого значения отношения $\Delta A/\Delta C$, а для компенсации асимметрии астигматизма по полю — подвижки линзы 1 (рис. 2) из-за большого значения отношения $\Delta A/\Delta C$.

Для окончательного определения облика конструкции необходимо знать, каким обра-

зом можно компенсировать сферическую aberrацию объектива при юстировке. Остаточная сферическая aberrация образуется из-за погрешностей определения радиусов кривизны, толщин, промежутков, номинала показателя преломления, фокусирующих свойств материалов.

Результаты компенсации сферической aberrации изменением межлинзового расстояния приведены в табл. 4.

Продольный сдвиг линзы 3 (рис. 2) влияет на кривизну поля, которая компенсируется смещением блока линз 5, 6, поскольку оно слабо влияет на сферическую aberrацию. В конструкции объектива должна быть предусмотрена возможность продольного смещения линзы 3 для компенсации сферической aberrации и блока линз 5, 6 для компенсации кривизны поля изображения.

Исходя из анализа влияния децентрировок линз, для объектива выбрана насыпная конструкция предварительно центрированных линз в корпусе, состоящем из двух полукорпусов. Для компенсации возможной остаточной сферической aberrации линза 3 установлена на промежуточное кольцо, а части корпуса 7 и 12 также соединены между собой через промежуточное кольцо, изменение толщины которого влияет на кривизну поля изображения. Для компенсации остаточных комы и астигматизма линзы 1 и 3 имеют возможность смещения поперечно в зазорах корпуса с помощью юстировочных винтов.

Таблица 4. Влияние смещений линз на aberrации объектива
Table 4. Influence of lenses shifts on the lens aberrations

№ децентрированной линзы (рис. 2)	Изменение aberrаций на длине волны λ_{int} при поперечном сдвиге 100 мкм			Асимметрия астигматизма ΔA	Отношения влияния децентрировки на асимметрию астигматизма и на кому в центре поля $\Delta A/\Delta C$	Влияние продольного сдвига линз на сферическую aberrацию
	Кома в центре поля ΔC	Астигматизм на поле $+\omega A+$	Астигматизм на поле $-\omega A-$			
1	–0,122	0,066	–0,661	0,727	–5,95	–0,046
2	0,008	–0,123	–0,166	0,043	5,37	–0,017
3	0,312	–0,214	–0,075	–0,139	–0,45	0,089
4	–0,159	–0,619	0,012	–0,631	3,97	–0,007
5	0,031	–0,141	–0,147	0,006	0,19	0,002
6	–0,069	–0,205	–0,147	–0,058	0,84	–0,001

Таблица 5. Измеренные RMS ВФ заготовок и результаты пересчета на RMS ВФ линз
Table 5. Measured RMS wavefront error of blanks and the results of its conversion to RMS wavefront error of lenses

№ линзы (рис. 2)	Диаметр и толщина заготовки	RMS _{bl}	RMS _{lens}	RMS _{loc}
1	Si, 303 мм, 61 мм	0,066	0,028	0,015
2	Si, 303 мм, 40 мм	0,038	0,017	0,009
3	Si, 300 мм, 61 мм	0,051	0,015	0,008
4	Ge, 214 мм, 52,4 мм	0,268	0,14	0,087
5	Si, 303 мм, 40 мм	0,033	0,019	0,01
6	Si, 300 мм, 37 мм	0,041	0,026	0,014
RMS _{hom}		0,288	0,049	0,033

КОНТРОЛЬ ЗАГОТОВОК ЛИНЗ

Интерферометрический контроль заготовок проводился на установке [4].

Результаты контроля приведены в виде значений RMS ВФ для плоскопараллельных заготовок на длине волны интерферометра и в пересчете на ход лучей в линзах и рабочую длину волны (табл. 5).

Очевидно, что RMS_{hom}, вызванное неоднородностью и рассчитанное по фактическим результатам контроля заготовок, приближается к предварительному прогнозируемому значению (см. табл. 1).

КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗ И МИНИМИЗАЦИЯ СУММАРНЫХ АСИММЕТРИЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАЗВОРОТОМ ЛИНЗ

Результаты контроля формы поверхностей и оптимизации в виде углов разворота линз приведены в табл. 6. Минимизация симметричных погрешностей проводится при использовании оптимизатора программы ZEMAX [18]. Исходными являются данные об астигматизме и коме, обусловленных формой поверхности линз и неоднородностью их материалов.

Линза 4 (рис. 2), устанавливаемая в корпус объектива первой, принята в качестве базовой (ориентация 0°).

Аберрации, вызванные отклонениями формы поверхности от заданной, приведены с учетом направления хода лучей в объективе на длине волны λ_{red} , в ZEMAX аберрации задаются с помощью функции Zernike Fringe Sag в миллиметрах [18]. Учитывая схему контроля формы поверхностей, аберрации

для вторых поверхностей приведены для развернутой вокруг вертикальной оси топограммы поверхности. Аберрации, вызванные неоднородностью материала, приведены на рабочей длине волны λ_{op} , в ZEMAX аберрации задаются с помощью функции Zernike Fringe Fringe в длинах волн λ_{op} .

СБОРКА И ЮСТИРОВКА ОБЪЕКТИВА

Центрировка сферических линз в оправе проводилась с использованием двух труб видимого диапазона [20], центрировка асферической линзы описана в публикациях [21, 22].

При установке в корпус линзы были ориентированы согласно расчету, полученному при оптимизации асимметричных аберраций 3-го порядка.

Первоначальная установка центрируемых в корпусе линз 1 и 3 проведена по автоколлимационному изображению от первой поверхности линз на поворотном столе.

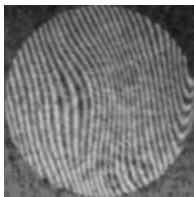
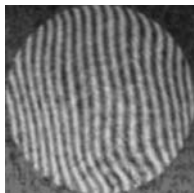
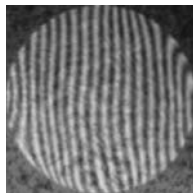
Затем объектив был проконтролирован в горизонтальной автоколлимационной схеме с помощью ИК интерферометра на длину волны 3,39 мкм [23].

Интерферограмма в центре поля приведена в табл. 7а. Астигматизм в центре поля незначителен, поэтому считаем оптимизацию разворотов линз завершенной. По интерферометрическим данным было рассчитано продольное смещение линзы 3 и блока линз 5, 6 (рис. 2) для компенсации сферической аберрации. Расчеты выполнены при использовании оптимизатора ZEMAX. Осевой сдвиг линзы 3 осуществлен проточкой промежуточного кольца на 0,48 мм. При этом промежуточное кольцо между блоками уменьшено на 1,62 мм.

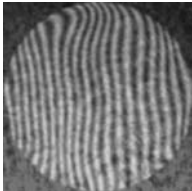
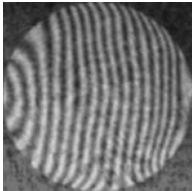
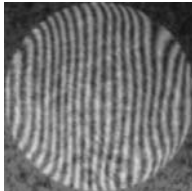
Таблица 6. Асимметричные aberrации и оптимальные углы поворота линз
Table 6. Asymmetric aberrations and optimal angles of lenses rotation

№ линзы (рис. 2)	Измеренный параметр	Аберрации				Угол поворота, град
		A_x	A_y	C_x	C_y	
1	Аберрации 1 поверхности	0,18	0,12	−0,08	0,1	−43
	Аберрации 2 поверхности	−0,08	0,14	0,02	0,01	
	Неоднородность материала	0,04	−0,02	0,02	−0,01	
2	Аберрации 1 поверхности	−0,1	0,02	0,04	0,16	89
	Аберрации 2 поверхности	−0,03	0,08	−0,04	0,18	
	Неоднородность материала	−0,03	−0,01	0,04	0,01	
3	Аберрации 1 поверхности	−0,12	0,06	−0,08	−0,18	15
	Аберрации 2 поверхности	0,07	0,02	0	0	
	Неоднородность материала	0	−0,03	0	0,01	
4	Аберрации 1 поверхности	0,14	0,12	0,06	−0,2	0
	Аберрации 2 поверхности	−0,06	0,16	−0,1	0,1	
	Неоднородность материала	−0,05	−0,01	0,02	−0,02	
5	Аберрации 1 поверхности	0,24	−0,28	−0,12	−0,2	85
	Аберрации 2 поверхности	0,24	0,16	0	0,08	
	Неоднородность материала	0	−0,01	−0,01	0,03	
6	Аберрации 1 поверхности	0,44	−0,24	0,32	0,24	−124
	Аберрации 2 поверхности	−0,16	−0,28	−0,04	0,24	
	Неоднородность материала	0,04	0	−0,01	−0,02	

Таблица 7. Результаты интерференционного контроля объектива
Table 7. The results of the interference control of the lens

	Поле −	Центр поля	Поле +
(а) Результаты после сборки объектива			
Интерферо- грамма	—		—
Аберрации	—	$S = -0,43, A_x = -0,016,$ $A_y = -0,033$	—
(б) Результаты после изменения межкомпонентных промежутков			
Интерферо- грамма			
Аберрации, RMS	$A_x = -0,507,$ $A_y = -0,054, \text{RMS} = 0,228\lambda_{\text{int}}$	$C_x = 0,151, C_y = 0,132,$ $S = -0,025, \text{RMS} = 0,122\lambda_{\text{int}}$	$A_x = 0,048,$ $A_y = 0,014, \text{RMS} = 0,098\lambda_{\text{int}}$

Окончание табл. 7

	Поле –	Центр поля	Поле +
	(в) Результаты после юстировки		
Интерферо- грамма			
Аберрации, RMS, ККЭ	$A_x = -0,282, A_y = -0,025,$ $RMS = 0,17\lambda_{int}, \delta_{EI} = 0,711$	$C_x = -0,043, C_y = 0,028,$ $RMS = 0,173\lambda_{int}, \delta_{EI} = 0,709$	$A_x = -0,255, A_y = 0,008,$ $RMS = 0,15\lambda_{int}, \delta_{EI} = 0,711$

Результаты контроля волновых аберраций в центре и на краях поля зрения приведены в табл. 7б.

По этим результатам с использованием зависимостей (см. табл. 4) рассчитаны поперечные линейные смещения линз 1 ($\Delta X = 0,085$ мм, $\Delta Y = 0,093$ мм) и 3 ($\Delta X = 0,019$ мм, $\Delta Y = 0,05$ мм) для компенсации комы в центре поля и астигматизма на краю поля. Результаты контроля волновых аберраций в центре и на краях поля зрения для единой плоскости приведены в табл. 7в.

На этом юстировка объектива была завершена. В табл. 7в приведены значения ККЭ в центре и на краях поля зрения в рабочем спектральном диапазоне после юстировки, удовлетворяющие техническим требованиям на объектив.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты проектирования и изготовления крупногабаритного высо-

коапертурного широкоугольного шестилинзового объектива для спектрального диапазона 3–5 мкм из оптических монокристаллов Si и Ge. Конструирование объектива проводилось с учетом результатов прогнозирования качества изображения, учитывающего оптическую однородность оптических материалов, отклонение формы поверхностей линз, децентрировку линз и минимизацию их влияния за счет разворота вокруг оси линз, бокового смещения заранее определенных линз, а также продольного смещения определенной группы линз. Это позволило создать высокотехнологичный широкоугольный объектив высокого разрешения с использованием заготовок среднего качества и линз, выполненных по традиционной технологии и имеющих отклонения по допуску на форму поверхности линз.

Полученный опыт может быть использован при создании крупногабаритных объективов из оптических кристаллов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bass M., DeCusatis C., Enoch J.M., et. al. Handbook of optics. 3rd ed. V. I: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments. McGraw Hill, 2009. 1248 p.
2. ГОСТ 23136-93. Материалы оптические. Параметры. Введ. 21.10.1993. М.: изд. Стандартов, 1995. 10 с. GOST (Russian National Standard) 23136-93. Optical materials. Parameters whiteness [in Russian]. Introd. 10/21/93. Moscow: "Standards" Publ., 1995. 10 p.
3. ISO 19740:2018. Optics and photonics — Optical materials and components — Test method for homogeneity of infrared optical materials. 05/08/2018. Geneva, ISO. 22 p.
4. Вензель В.И., Мигель Л.И., Семёнов А.А. Установка для контроля однородности показателя преломления ИК материалов // Контенант. 2021. Т. 3. № 2. С. 12–25.
5. Вензель В.И., Горелов А.В., Образцов В.С. и др. Контроль оптической однородности материалов для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 9. С. 88–94.
6. Venzel V.I., Migel L.I., Semenov A.A. The system for monitoring the optical homogeneity of the material for the infrared spectrum [in Russian] // Contenant. 2021. V. 3. № 2. P. 12–25.
7. Venzel V.I., Gorelov A.V., Obraztsov V.S., et. al. Monitoring the optical homogeneity of materials for the IR region // J. Opt. Technol. 2014. V. 81. № 9. P. 551–555. <https://doi.org/10.1364/JOT.81.000551>

6. Крынин Л.И. Проектирование конструкций объективов: учеб. пособ. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2018. 219 с. Krynin L.I. Designed lens structures: Study Guide [in Russian]. St. Petersburg: St. Petersburg: ITMO University, 2018. 219 p.
7. Бетенски Э., Хопкинс Р., Шеннон Р. и др. Проектирование оптических систем: пер. с англ. // Под ред. Шеннона Р., Вайанта Дж. / М.: Мир, 1983. 432 с. Betenski E., Hopkins R., Shannon R., et. al. Applied optics and optical engineering // Ed. Shannon R., Wyant J.C. / N.Y.: Academic Press Inc., 1979. 382 p.
8. Васильева Л.В., Лебедев О.А., Нужин В.С. и др. Проектирование и изготовление линзовых объективов для работы в инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2003. Т. 80. № 4. С. 72–75. Vasilieva L.V., Lebedev O.A., Nuzhin V.S., et. al. Design and fabrication of lens objectives for operation in the IR region // J. Opt. Technol. 2003. V. 70. № 4. P. 280–283. <https://doi.org/10.1364/JOT.70.000280>
9. Лебедев О.А., Сабинин В.Е., Солк С.В. Крупногабаритный многоспектральный объектив // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 11. С. 24–27. Lebedev O.A., Sabinin V.E., Solk S.V. A large multi-spectral objective // J. Opt. Technol. 2011. V. 78. № 11. P. 709–711. <https://doi.org/10.1364/JOT.78.000709>
10. Лебедев О.А., Нужин В.С., Солк С.В. Проектирование и контроль широкоугольных ИК объективов // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 2. С. 45–47. Lebedev O.A., Nuzhin V.S., Solk S.V. Designing and testing wideangle IR objectives // J. Opt. Technol. 2013. V. 80. № 2. P. 104–106. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000104>
11. Солк С.В., Лебедев О.А. Инфракрасный терморасстраиваемый объектив // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 12. С. 38–40. Solk S.V., Lebedev O.A. A thermally nonmisalignable infrared objective // J. Opt. Technol. 2012. V. 79. № 12. P. 775–776. <https://doi.org/10.1364/JOT.79.000775>
12. Буй Д.Б. Анализ и разработка методов центрирования линз и линзовых систем // Дисс. канд. техн. наук. СПб.: СПбНИУ ИТМО, 2016. 131 с. Bui D.B. Analysis and development of the methods for centering lenses and lens systems [in Russian] // PhD (Engineering). St. Petersburg: ITMO University, 2016. 131 p.
13. Латыев С.М., Румянцев Д.М., Курицын П.А. Конструкторские и технологические методы обеспечения центровки линзовых систем // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 92–96. Latyev S.M., Rumyantsev D.M., Kuritsyn P.A. Design and process methods of centering lens systems // J. Opt. Technol. 2013. V. 80. № 3. P. 197–200. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000197>
14. Буй Д.Б., Беловайн П.А., Латыев С.М. и др. Центровка объективов штабельной конструкции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Bui D. B., Belovain P.A., Latyev S.M., et. al. Centering of stacked lenses [in Russian] // Modern Problems of Sciences and Educations. 2015. № 1.
15. Крынин Л.И., Фролов Д.Н., Шаталов Е.А. Методика расчета конструкций объективов насыпного типа // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 9. С. 58–62. Krynin L., Frolov D., Shatalov E. Technique for calculating the designs of filled-type objectives // J. Opt. Technol. 2002. V. 69. № 9. P. 652. <https://doi.org/10.1364/JOT.69.000652>
16. Канушина Л.А., Соснов А.Н., Соснова Н.К. Расчет допусков на оптические неоднородности оптических материалов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. С. 262–267. Kanushina L.A., Sosnov A.N., Sosnova N.K. Calculating of tolerances for optical inhomogeneties of optical materials [in Russian] // Interexpo Geo Siberia. 2013. P. 262–267.
17. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптических изображений. Л.: Машиностроение, ЛО, 1989. 221 с. Sokolskiy M.N. Optical image tolerance and quality [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., Leningrad Branch, 1989. 221 p.
18. ZEMAX 9. Optical Design Program. User's Manual. April 14, 2010. 986 p.
19. Вензель В.И., Дмитриев И.Ю., Муравьева Е.С. и др. Технология создания светосильного четырехзеркального объектива с асферическими зеркалами // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 1. С. 26–36. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-01-26-36> Venzel V.I., Dmitriev I.Yu., Muraveva E.S., et. al. Technology for developing a high-aperture fourmirror lens with aspherical mirrors // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 1. P. 14–19. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000014>
20. Никаноров Н.Ю., Артемов А.Д. Комбинированный метод центрирования линз из непрозрачных материалов в видимой области спектра // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. С. 269–278. Nikanorov N.Y., Artemov A.D. Combined centering methods made of opaque materials [in Russian] // Interexpo Geo Siberia. 2019. P. 269–278.
21. Вензель В.И., Семёнов А.А. Интерферометрическое устройство центровки оптических элементов с асферическими поверхностями в оправках // Патент РФ № 186481. Бюл. 2019. № 3. Venzel V.I., Semenov A.A. Interferometric device for centering optical elements with aspherical surfaces in frames // RF Patent № RU186481U1. Bull. 2019. № 3.
22. Азаров С.А., Вензель В.И., Либик Ю.М. и др. Технология изготовления крупногабаритных линз с асферической поверхностью // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 73–81. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-73-81> Azarov S.A., Venzel V.I., Libik Y.M., et. al. Manufacturing technology for large-sized aspheric lenses // J. Opt. Technol. 2024. V. 91. № 9. P. 00–00. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-00-00>
23. Вензель В.И., Горелов А.В. Интерферометры среднего и дальнего инфракрасного диапазона спектра ИКИ-3,5 и ИКИ-10 // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 11. С. 47–49. Venzel V.I., Gorelov A.V. The IKI-3.5 and IKI-10 interferometers for the mid- and far-IR regions // J. Opt. Technol. 2008. V. 75. № 11. P. 725–727. <https://doi.org/10.1364/JOT.75.000725>

АВТОРЫ

Владимир Иванович Вензель — начальник лаборатории, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; Scopus ID: 7801676016; <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>; venzelvi@nioep.ru

Игорь Юрьевич Дмитриев — доктор технических наук, начальник отдела — главный конструктор, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>; dmitrieviy@nioep.ru

Елена Станиславовна Муравьева — инженер 1 категории, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-4544-4110>, muravyevaes@nioep.ru

Андрей Александрович Семёнов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; Scopus ID 57211805420; <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>; semenovaa@nioep.ru

Статья поступила в редакцию 04.03.2024
Одобрена после рецензирования 22.04.2024
Принята к печати 29.07.2024

AUTHORS

Valdimir I. Venzel — Head of the Laboratory, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; Scopus ID 7801676016; <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>; venzelvi@nioep.ru

Igor Y. Dmitriev — Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department — Chief Designer, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4426-8191>; dmitrieviy@nioep.ru

Elena S. Muraveva — Engineer of the 1st category, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-4544-4110>, muravyevaes@nioep.ru

Andrey A. Semenov — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; Scopus ID: 57211805420; <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>; semenovaa@nioep.ru

The article was submitted to the editorial office 04.03.2024
Approved after review 22.04.2024
Accepted for publication 27.07.2024