

УДК 535.317:535.326:004.42
DOI 10.17513/snt.40900



CC BY 4.0

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАДИАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМИ ЛИНЗАМИ

Железняков А. А. ORCID ID 0009-0006-5252-3307,

Грейсукх Г. И. ORCID ID 0000-0003-4339-9245

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,
Пенза, Российская Федерация, e-mail: grey@pguas.ru*

Наиболее широкие возможности коррекции аберраций оптической системы предоставляют радиально-градиентные линзы. Неоднородный материал этих линз может быть получен одной из аддитивных технологий путем варьирования пространственного распределения концентраций каждого из его компонентов. При этом выбор оптических материалов компонентов во многом определяет качество формируемого изображения и характеристики проектируемой системы. Поэтому глобальная оптимизация оптических систем с градиентными линзами должна включать перебор материалов и варьирование распределением их концентраций. Целью исследования является разработка программного комплекса для глобальной полихроматической оптимизации оптических систем с радиально-градиентными линзами в среде Zemax OpticStudio и демонстрация эффективности комплекса на примере расчета инфракрасного объектива с градиентной линзой. В статье рассматриваются пути и особенности моделирования двухкомпонентных неоднородных материалов поверхностью Gradient 6 и анализируются ограничения стандартных средств программного пакета при решении задач автоматизированного перебора комбинаций материалов. Предложена архитектура программного комплекса, основанная на разделении вычислительного процесса на этапы подготовки данных, выполнения оптимизационных расчетов и последующей обработки результатов. Для реализации комплекса использованы языки программирования Python и ZPL, обеспечивающие взаимодействие внешних вычислительных модулей со средой оптического проектирования. Работоспособность программного комплекса подтверждена на примере глобальной оптимизации инфракрасного объектива, состоящего из двух однородных и одной радиально-градиентной линзы. В результате автоматизированного исследования множества комбинаций материалов получено решение, увеличившее светосилу объектива при сохранении требуемого качества изображения. Показано, что использование разработанного программного комплекса позволяет исключить выполнение большого количества ручных операций и обеспечить воспроизводимость результатов расчетов. Сделан вывод о целесообразности дальнейшего анализа эффективности разработанного программного комплекса на более широком классе оптических систем, включающих градиентные элементы, а также развития комплекса на основе методов машинного обучения.

Ключевые слова: программный комплекс, глобальная полихроматическая оптимизация, радиально-градиентная линза, автоматизация проектирования оптических систем

SOFTWARE PACKAGE FOR GLOBAL POLYCHROMATIC OPTIMIZATION OF OPTICAL SYSTEMS WITH RADIAL-GRADIENT LENSES

Zheleznyakov A. A. ORCID ID 0009-0006-5252-3307,

Greysukh G. I. ORCID ID 0000-0003-4339-9245

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Penza State University of Architecture and Construction”,
Penza, Russian Federation, e-mail: grey@pguas.ru*

Radial gradient lenses offer the broadest possibilities for correcting optical system aberrations. The inhomogeneous material of these lenses can be produced using additive technologies by varying the spatial distribution of concentrations of each of its components. The choice of optical materials for the components largely determines the quality of the formed image and the characteristics of the designed system. Therefore, global optimization of optical systems with gradient lenses should include material selection and varying their concentration distribution. The aim of this work is to develop a software package for global polychromatic optimization of optical systems with radial gradient lenses in the Zemax OpticStudio environment and to demonstrate the effectiveness of the package using the example of calculating an infrared lens with a gradient lens. This article discusses the methods and features of modeling two-component inhomogeneous materials using the Gradient 6 surface and analyzes the limitations of standard software tools in solving problems of automated material selection. A software package architecture is proposed based on dividing the computational process into the stages of data preparation, optimization calculations, and subsequent processing of the results. The Python and ZPL programming languages were used to implement the software, enabling interaction between external computing modules and the optical design environment. The software's performance was validated using a global optimization of an infrared lens consisting of two homogeneous lenses and one radial-gradient lens. An automated study of multiple material combinations resulted in a solution that increased the lens's aperture ratio while maintaining the required image quality. It was demonstrated that the developed software eliminates numerous manual operations and ensures the reproducibility of calculation results. It was concluded that it is advisable to further analyze the effectiveness of the developed software package on a wider class of optical systems that include gradient elements, as well as to develop the package based on machine learning methods.

Keywords: software package, global polychromatic optimization, radial-gradient lens, automation of optical system design

Введение

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к градиентной оптике [1; 2]. Он обусловлен, в частности, развитием технологий изготовления неоднородных оптических материалов [3, с. 75–84; 4; 5]. Особенно перспективными являются радиально-градиентные линзы (РГЛ), позволяющие эффективно корректировать aberrации и расширяющие возможности оптического проектирования [4; 6, с. 223–230]. Для моделирования таких элементов широко применяется двухкомпонентная модель, в которой показатель преломления неоднородного материала определяется свойствами двух исходных компонентов и пространственным распределением их концентраций [7, с. 15–22; 8; 9]. В результате одна из основных задач при проектировании оптических систем с РГЛ сводится к выбору материалов компонентов неоднородной среды.

При наличии десятков доступных оптических материалов количество возможных комбинаций становится весьма значительным, что требует проведения большого числа оптимизационных расчетов. Выполнение подобных исследований вручную является трудоемкой задачей и существенно ограничивает эффективность поиска оптимальных решений.

Несмотря на наличие в программе Zemax OpticStudio [10] специализированных средств моделирования радиально-градиентных элементов, стандартный функционал не обеспечивает автоматизированного перебора большого количества комбинаций материалов с последующей глобальной оптимизацией и сравнительным анализом полученных результатов. В связи с этим возникает необходимость разработки специализированных программных средств, способных автоматизировать данные процедуры.

Цель исследования – разработка программного комплекса для глобальной полихроматической оптимизации оптических систем с радиально-градиентными линзами в среде Zemax OpticStudio и демонстрация эффективности комплекса на примере расчета инфракрасного объектива с градиентной линзой.

Материалы и методы исследования

Материал и методы исследования включают архитектуру комплекса, его программную реализацию на языках ZPL [10] и Python [11, с. 279–315], теоретический и численный анализ, автоматизированную оптимизацию оптических систем в среде Zemax на примере инфракрасного объектива с радиально-градиентной линзой.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Постановка задачи глобальной оптимизации оптических систем с РГЛ

При проектировании оптических систем с РГЛ существенное влияние на качество изображения оказывают не только конструктивные параметры системы, но и свойства неоднородного материала градиентного элемента. В большинстве практических случаев неоднородный материал РГЛ может быть описан, как уже отмечалось во введении, двухкомпонентной моделью, в рамках которой показатель преломления определяется линейной комбинацией показателей преломления двух исходных компонентов

$$n(\rho, \lambda) = C_1(\rho)n_1(\lambda) + C_2(\rho)n_2(\lambda),$$

где $n_1(\lambda)$ и $n_2(\lambda)$ – показатели преломления компонентов на длине волны λ , а $C_1(\rho)$ и $C_2(\rho)$ – их относительные концентрации на расстоянии ρ от оптической оси, удовлетворяющие условию $C_1(\rho) + C_2(\rho) = 1$.

В программе Zemax OpticStudio фронтальная поверхность РГЛ (сфероидальная, параболическая или гиперболическая) и ее оптический материал моделируются поверхностью Gradient 6. Радиальное распределение показателя преломления материала задается рядом коэффициентов $n_{00}(\lambda) - n_{40}(\lambda)$, каждый из которых представляет собой спектральную функцию длины волны. Значения данных коэффициентов определяются выбранной парой материалов и параметрами распределения концентрации компонентов.

На этапе проектирования возникает задача выбора наиболее эффективной комбинации материалов для формирования неоднородной среды РГЛ. При наличии каталога, содержащего десятки оптических материалов, число возможных сочетаний быстро возрастает и может достигать сотен или тысяч вариантов. Для каждой комбинации необходимо сформировать параметры материала поверхности Gradient 6, выполнить оптимизацию оптической системы и оценить полученные характеристики качества изображения.

Существенным ограничением является то, что программный пакет Zemax OpticStudio не предоставляет возможности прямой оптимизации спектральных коэффициентов материала поверхности Gradient 6. Вследствие этого поиск оптимального материала радиально-градиентной линзы должен осуществляться путем последовательного перебора пар стекол компонентов неоднородной среды с последующей оптимизацией остальных параметров системы.

Таким образом, задача глобальной полихроматической оптимизации оптической системы с РГЛ сводится к поиску глобального минимума целевой функции по всем параметрам системы, влияющим на эту функцию, включая комбинацию компонентов неоднородного материала РГЛ. Что касается целевой функции, формируемой пользователем, то она должна быть направлена на достижение при заданной светосиле в рабочем спектральном диапазоне и интервале полевых углов, наивысшего качества формируемого изображения (оцениваемого по диаграмме рассеяния лучей (ДРЛ) или частотно-контрастной характеристике (ЧКХ)). При этом допустимые изменения конструктивных параметров должны удовлетворять условию сохранения продольного габарита оптической системы и учитывать технологические ограничения на толщины элементов, воздушные промежутки и радиусы кривизны преломляющих поверхностей.

Реализация поставленной задачи требует автоматизации процедур подготовки данных, выполнения расчетов и обработки результатов, что и обусловило разработку специализированного программного комплекса.

2. Архитектура и алгоритм работы программного комплекса

Практическая реализация глобальной полихроматической оптимизации связана с необходимостью выполнения большого числа однотипных вычислительных операций. Для каждой исследуемой пары материалов требуется вычислить их спектральные коэффициенты, которые необходимы для поверхности Gradient 6, выполнить оптимизацию оптической системы и сохранить полученные результаты для последующего анализа. При большом количестве рассматриваемых комбинаций ручное выполнение подобных действий становится трудоемким и неэффективным. Для автоматизации данного процесса был разработан специализированный программный комплекс, реализованный с использованием языков Python и ZPL.

Архитектура комплекса основана на разделении общего вычислительного процесса на три последовательных этапа, каждому из которых соответствует отдельный программный модуль.

Первый этап предназначен для подготовки исходных данных. На данном этапе модуль, реализованный на языке Python версии 3.10 с использованием библиотек: pandas для чтения данных из Excel-файлов, numpy для матричных вычисле-

ний, openpyxl в качестве движка для работы с файлами формата .xlsx, – формирует из полного списка стекол пары согласно заданным условиям. Перечень всех пар стекол, подлежащих исследованию, заносится в конфигурационный файл.

Для каждой сформированной пары стекол рассчитываются спектральные коэффициенты материала поверхности Gradient 6. Полученные коэффициенты автоматически записываются в файлы формата .DAT (рис. 1), совместимые со встроенной базой данных программы.

```
ILINSKY2322
2.775857716254178
-0.000000000123457
116836.018806357315043
0
-0.000007031859580
-0.000000000000007
-0.555861702918418
0
0
0
0
0
0
ILINSKY2321
2.775857716254178
-0.000000000123457
116836.018806357315043
0
-0.000078284257038
-0.0000000000000056
-29.361394953999593
0
0
0
0
0
0
```

Рис. 1. Пример структуры формируемого .DAT-файла
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В результате из каждой пары материалов формируется соответствующий виртуальный оптический материал, доступный для дальнейшего использования при расчетах. Дополнительно создается конфигурационный файл, содержащий перечень всех комбинаций стекол, подлежащих исследованию.

Основной расчетный этап выполняется непосредственно в среде Zemax OpticStudio 13 R2 с использованием встроенного алгоритма локальной оптимизации Damped Least Squares под управлением ZPL-скрипта.

Скрипт последовательно перебирает виртуальные оптические материалы поверхности Gradient 6 (так же при необходимости может происходить перебор материалов однородных линз), и с каждым из них запускает оптимизацию. При этом варьируются все разрешенные конструктивные параметры оптической схемы, тогда как параметры неоднородного материала остаются фиксированными и определяются выбранной парой компонентов.

Для оценки достигнутого качества изображения при заданной светосиле в рабочем спектральном диапазоне и интервале полевых углов может использоваться одна из характеристик ДРЛ или минимальный уровень полихроматической дифракционной ЧКХ на заданной пространственной частоте.

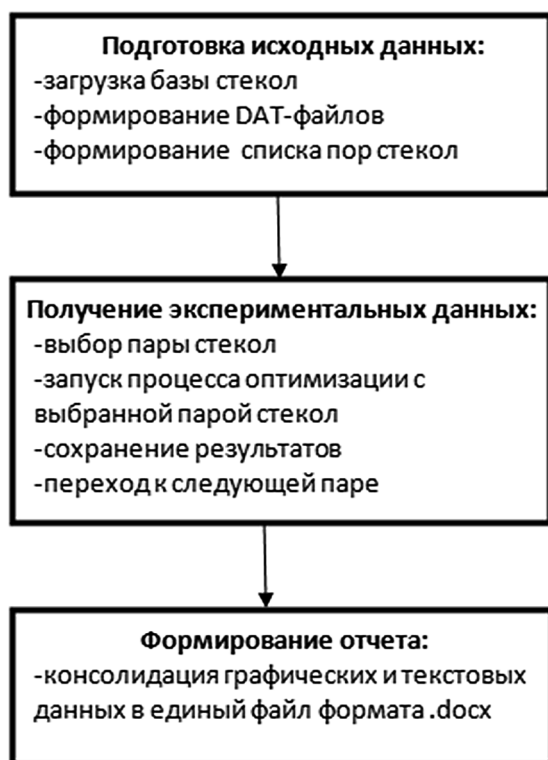


Рис. 2. Основные этапы работы программного комплекса
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Завершается каждая оптимизация после выполнения заданного числа циклов, и тогда автоматически сохраняются варьирувавшиеся параметры системы и достигнутые характеристики изображения, включая геометрический и среднеквадратичный радиусы ДРЛ.

После завершения перебора всех комбинаций оптических материалов управ-

ление вновь передается Python-модулю для анализа результатов. Задачей анализа является консолидация данных, полученных в ходе многочисленных независимых расчетов. Модуль автоматически извлекает сохраненные числовые характеристики и графические материалы, выполняет их структурирование и формирует итоговый аналитический отчет в формате DOCX. Отчет содержит сведения обо всех исследованных вариантах и позволяет проводить сравнительный анализ полученных решений по выбранным критериям качества. Последовательность выполнения основных операций программного комплекса представлена на рис. 2 [12].

Все расчеты выполнены на персональном компьютере с операционной системой Microsoft Windows 10/11.

3. Результаты апробации и оценка эффективности программного комплекса

Работоспособность разработанного программного комплекса была проверена на задаче глобальной полихроматической оптимизации трехлинзового инфракрасного объектива, состоящего из двух однородных линз и одной РГЛ. В качестве исходного решения использовался объектив, ранее разработанный по методике проектирования оптических систем с РГЛ [13; 9]. Объектив рассчитан на одновременную работу в двух спектральных диапазонах: 3,5–5 мкм и 8–11,9 мкм. В качестве приемника излучения предполагалось использование двухдиапазонного неохлаждаемого матричного микроболометра формата 640×480 или 640×512 с шагом пикселя 17 мкм [14; 15].

В качестве цели оптимизации рассматривалось повышение светосилы системы при сохранении требуемого качества изображения.

Учитывая, что в программе Zemax предусмотрена возможность последовательного перебора различных марок стекол для однородных линз, при апробации комплекса материалы однородных линз в процессе оптимизации не изменялись (в качестве однородных материалов были выбраны стекла IIR-SF1 и AMTIR3).

Что же касается материалов РГЛ, то в программный комплекс был загружен каталог, содержащий данные о серии халькогенидных стекол NRL-01, NRL-11 – NRL-23 [16]. Используя дисперсионные формулы каждой пары материалов, выбранной из этого каталога, формировались спектральные коэффициенты неоднородных материалов поверхностей Gradient 6, которые задействовались в последующей оптимизации.

Основные характеристики исходного (строка 2)
и оптимизированного (строка 3) объективов

	f' , мм	K	L , мм	2ω , °	T	δ_G , мкм	δ_{RMS} , мкм	D , %
Исходный объектив	40	0,92	80	19,5	0,56	122,7	33,1	0,6
Оптимизированный объектив		0,82			0,57	37,1	11,3	0,96

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Общее число перебираемых пар материалов за исключением тех, у которых разница показателей преломления на центральной длине волны заданного спектрального диапазона превышала 0,08, составило 34. После завершения подготовительного этапа программный комплекс выполнял автоматизированный перебор поверхностей Gradient 6 и запуск процедур оптимизации. При этом с целью минимизации затрат машинного времени для оценки достигнутого качества изображения использовались среднеквадратичные радиусы ДРЛ.

Для каждой исследуемой пары осуществлялось сохранение варьируемых конструктивных параметров и параметров ДРЛ, что позволяло провести объективное сравнение полученных решений. При этом удачными считались те решения, у которых среднеквадратичный радиус ДРЛ был равен или меньше, чем 1,2 от минимально достигнутого. Для этих решений выполняется расчет и экспорт графических результатов, таких как абберрационные кривые и ЧКХ. Это позволило выбрать решение с наилучшей комбинацией всех значимых параметров.

Наилучшим, демонстрирующим достижение поставленной цели, оказалось решение, в котором в качестве приосевого и периферийного компонентов неоднородного материала РГЛ использовались халькогенидные стекла NRL-18 и NRL-17 соответственно. Разность показателей преломления данных компонентов на центральной длине волны рабочего диапазона составляет $2,64 - 2,61 = 0,03$, что определяет перепад показателя преломления в градиентной линзе. При этом данная величина меньше предельно достижимой разности показателей преломления для всей серии стекол NRL-01 – NRL-23, которая равна 0,3, что подтверждает принципиальную технологическую реализуемость найденного решения. Основные характеристики исходного объектива и объектива с вышеуказанными компонентами РГЛ представлены в таблице. В ней f' – заднее фокусное расстояние; K – диафрагменное число;

L – продольный габарит, то есть расстояние от вершины фронтальной поверхности до плоскости изображения; 2ω – угловое поле в пространстве предметов; T – минимальное значение дифракционной полихроматической частотно-контрастной характеристики в пределах всего поля изображения на пространственной частоте Найквиста матричного фотоприемника 30 мм^{-1} ; δ_G – максимальный геометрический радиус диаграммы рассеяния лучей; δ_{RMS} – максимальный среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей; D – максимальная дисторсия в пределах поля зрения.

Проведенная проверка подтвердила эффективность разработанного программного комплекса при решении задач глобальной оптимизации оптических систем с радиально-градиентными элементами. Использование комплекса позволило полностью автоматизировать формирование параметров неоднородных материалов, исключить ручной перебор комбинаций стекол и обеспечить выполнение большого количества независимых оптимизационных расчетов без участия пользователя. А благодаря формируемым отчетам, позволяющим осуществлять сравнительный анализ полученных решений, существенно упрощается процесс выбора перспективных вариантов и обеспечивается воспроизводимость результатов проектирования.

Таким образом, результаты проверки показали, что разработанный программный комплекс может рассматриваться как эффективный инструмент автоматизации проектирования оптических систем с радиально-градиентными линзами и использоваться для исследования больших массивов комбинаций оптических материалов, недоступных для полноценного анализа при выполнении расчетов вручную.

4. Перспективы развития

Разработанный программный комплекс представляет собой основу для дальнейшего развития средств автоматизированного проектирования оптических систем с радиально-градиентными элементами. Одним

из наиболее перспективных направлений совершенствования является внедрение методов машинного обучения для предварительной оценки эффективности перебираемых комбинаций оптических материалов.

Благодаря тому, что в процессе работы комплекса формируется база данных, содержащая сведения о параметрах материалов компонентов радиально-градиентных линз и результаты предварительных оптимизационных расчетов, создаются предпосылки для построения прогнозных моделей, способных оценивать перспективность новых комбинаций материалов до выполнения полной процедуры оптимизации. Использование таких моделей позволит сократить количество ресурсоемких вычислений и сосредоточить расчетные ресурсы на наиболее перспективных вариантах.

Другим направлением развития является переход от файлового обмена данными к использованию современных программных интерфейсов взаимодействия с Zemax OpticStudio. Прямая интеграция с программной средой позволит повысить скорость выполнения расчетов и расширить возможности автоматизированного управления процессом оптимизации.

Представляет интерес также расширение области применения комплекса на более сложные оптические системы, содержащие несколько градиентных элементов. Модульная архитектура программного обеспечения допускает адаптацию алгоритмов для работы с трехкомпонентными моделями неоднородных материалов, а также с различными типами градиентных поверхностей.

Таким образом, дальнейшее развитие комплекса связано как с совершенствованием алгоритмов поиска оптимальных решений, так и с расширением круга задач, решаемых средствами автоматизированного проектирования оптических систем.

Заключение

В работе представлен программный комплекс для глобальной полихроматической оптимизации оптических систем с радиально-градиентными линзами в среде Zemax OpticStudio. Необходимость его разработки обусловлена высокой трудоемкостью исследований, связанных с перебором большого количества комбинаций оптических материалов компонентов неоднородной среды и выполнением многократных оптимизационных расчетов.

Предложенная архитектура комплекса основана на разделении вычислительного процесса на три последовательных этапа: подготовку данных о материалах и форми-

рование параметров поверхности Gradient 6, автоматизированное выполнение оптимизационных расчетов в среде Zemax OpticStudio и последующую обработку полученных результатов. Для реализации комплекса использованы языки программирования Python и ZPL, обеспечивающие эффективное взаимодействие внешних вычислительных модулей со средствами оптического проектирования.

Работоспособность программного комплекса подтверждена на примере глобальной оптимизации инфракрасного объектива, состоящего из двух однородных линз и одной РГЛ. В результате автоматизированного исследования множества комбинаций материалов получено решение, увеличившее светосилу объектива благодаря уменьшению его диафрагменного числа с 0,92 до 0,82 при сохранении требуемого уровня качества изображения.

Разработанный программный комплекс обеспечивает воспроизводимость расчетов, исключает необходимость выполнения большого количества ручных операций и позволяет проводить сравнительный анализ значительного числа проектных решений. Благодаря модульной структуре комплекс может быть адаптирован для решения более широкого круга задач проектирования оптических систем с неоднородными материалами

Список литературы

1. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., Sanghera J., Kottov M., Miklos R., McClain C. IR-GRIN optics for imaging // *Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR: Proceedings of SPIE*. 2016. Vol. 9822. Art. 98220R. DOI: 10.1117/12.2224094.
2. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., Sanghera J., Kottov M., Drake G. GRIN optics for multispectral infrared imaging // *Proceedings of SPIE*. 2015. Vol. 9451. Art. 94511P. DOI: 10.1117/12.2177136.
3. Corsetti J. A., Moore D. T. Design of a ZnS/ZnSe Radial Gradient-Index Objective Lens in the Mid-Wave Infrared // *Imaging and Applied Optics*. OSA Technical Digest (online). Optica Publishing Group, 2013. Paper ITu2E.3. DOI: 10.1364/ISA.2013.ITu2E.3.
4. Williams G. M., Harmon J. P. Dispersion controlled nanocomposite gradient index lenses // *Optics Continuum* 2023. Vol. 2. Is. 2. P. 456–472. DOI: 10.1364/optcon.481205.
5. Williams G. M., Akhavan H., Dupuy C., Harmon J. Additive Manufacturing of Freeform Optics for Defense Applications // *2021 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID)*. IEEE. 2021. P. 1–2. DOI: 10.1109/RAPID51799.2021.9521386.
6. Greisukh G. I., Bobrov S. T., Stepanov S. A. *Optics of Diffractive and Gradient-Index Elements and Systems*. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press. 1997. XX. 391 p. (Press Monographs). DOI: 10.1117/3.2570044. ISBN 0-8194-2451-X.
7. McCarthy P. W. *Gradient-index materials, design, and metrology for broadband imaging systems: diss. PhD*. Rochester, 2015. 219 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://urresearch>.

rochester.edu/institutionalPublicationPublicView.action?institutionalItemId=28867 (дата обращения: 20.05.2026).

8. Yang T., Lippman D. H., Chou R. Y., Kochan N. S., Desai A. X., Schmidt G. R., Bentley J. L., Moore D. T. Material optimization in the design of broadband gradient-index optics // Proceedings of SPIE – International Optical Design Conference (IODC) 2021. Vol. 12078. 120780Z. DOI: 10.1117/12.2603644.

9. Грейсух Г. И., Левин И. А., Ежов Е. Г. Двухкомпонентная модель градиентного оптического материала в методиках расчета оптических систем // Физические основы приборостроения. 2025. Т. 14. № 2 (56). С. 94–99. DOI: 10.25210/jfop2502-SRMTVZ. EDN: SRMTVZ.

10. Radiant Zemax LLC. Zemax 13 Release 2: optical and illumination design software [программное обеспечение]. Redmond, WA, 2013. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.photonics.com/Products/Zemax-13-Release-2-Software/pr54615> (дата обращения: 20.05.2026).

11. Прохоренко Н. А., Дронов В. А. Python 3: самое необходимое. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2021. 605 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012485392/ (дата обращения: 21.08.2026). ISBN 978-5-9775-3994-4.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026662739 Российская Федерация. Программа для глобальной полихроматической оптимизации оптических систем с градиентными элементами в среде Zemax / А. А. Железняков, Г. И. Грейсух; правообладатель:

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства». Заявка № 2026661678; дата поступления 21.04.2026; дата государственной регистрации 29.04.2026; опубл. 29.04.2026, Бюл. № 5. Объем программы: 12 КБ. [Электронный ресурс]. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2026662739&TypeFile=html (дата обращения: 27.07.2026).

13. Грейсух Г. И., Левин И. А., Ежов Е. Г. Моделирование ламинированной радиально-градиентной линзы; расчет и достижимые характеристики двухдиапазонного инфракрасного триплета с такой линзой // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 34–42. DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-34-42.

14. SCD SemiConductor Devices. Bird 640-17 μm , Ceramic: 640 $\times$ 480, 17 μm pitch, VOx Microbolometer, Ceramic TEC-less Package [Электронный ресурс]. URL: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

15. ОКБ «АСТРОН». АСТРОН-64017-2: микробопометрический двухспектральный матричный детектор. 18.05.2026. [Электронный ресурс]. URL: <https://astrohn.ru/2026/05/18/astrohn-64017-2/> (дата обращения: 25.05.2026).

16. Beadie G., Stover E., Gibson D. Temperature-dependent dispersion fitting for a recent infrared glass catalog // Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 10998. Art. 1099804. DOI: 10.1117/12.2518494.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено за счет субсидии из федерального бюджета РФ на реализацию государственного задания Минобрнауки РФ № FSGS-2024-0005.

Financing: The study was carried out using a subsidy from the federal budget of the Russian Federation for the implementation of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FSGS-2024-0005.