

## Методика проектирования объективов, включающих градиентную линзу, моделируемую двухкомпонентной линейной моделью

Г.И. Грейсух<sup>1</sup>, И.А. Левин<sup>2</sup>, Е.Г. Ежов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
440028, Россия, г. Пенза, ул. Титова, д. 28;

<sup>2</sup> Красногорский завод им. С.А. Зверева, 143403, Россия, Московская обл., г. Красногорск, ул. Речная, д. 8

### Аннотация

В статье представлена методика проектирования объективов-апохроматов с радиально-градиентной линзой, неоднородный оптический материал которой может быть получен одной из аддитивных технологий и успешно описан в рамках двухкомпонентной линейной модели. В рамках этой модели получены использующиеся в представленной методике формулы для дисперсионных характеристик радиально-градиентных линз. Сама же методика направлена на получение предельно возможных оптических характеристик у простых по конструкции объективов. Отличительной особенностью методики является то, что уже на первоначальном этапе расчёта объектива-монохромата обеспечивается будущая апохроматизация, сопровождающая переход к полихроматическому излучению. Это достигается сочетанием оптимизации по конструктивным параметрам объектива-монохромата с соответствующим подбором двух компонентов композитного материала градиентной линзы и оптических материалов двух однородных линз.

Даны рекомендации по использованию программы оптического проектирования ZEMAX для оптимизации и специализированного пользовательского макроса для перебора оптических материалов и оценки степени достигнутой апохроматизации. Эффективность представленной методики и рекомендаций по её практическому использованию демонстрируется результатами расчёта инфракрасного триплета, который при относительном отверстии 1:0,88 и в двойном спектральном диапазоне (3,5–5 и 8–11,9 мкм) формирует изображение по всему полю с контрастом не ниже 0,56 на пространственной частоте 30 мм<sup>-1</sup>. Этот результат подтверждает, что при использовании представленной методики апохроматизация не сопровождается сколь-нибудь серьёзным нарушением коррекции полевых aberrаций, достигнутой на монохроматическом этапе расчёта, что позволяет обеспечить высокое качество изображения при значительной светосиле.

**Ключевые слова:** аддитивная технология, радиально-градиентная линза, двухкомпонентная линейная модель, объектив-апохромат, методика проектирования.

**Цитирование:** Грейсух, Г.И. Методика проектирования объективов, включающих градиентную линзу, моделируемую двухкомпонентной линейной моделью / Г.И. Грейсух, И.А. Левин, Е.Г. Ежов // Компьютерная оптика. – 2026. – Т. 50, № 3. – 1794. – doi: 10.18287/COJ1794.

**Citation:** Greisukh GI, Levin IA, Ezhov EG. Methodology for designing objectives including a gradient lens modeled by a two-component linear model. Computer Optics 2026; 50(3): 1794. doi: 10.18287/COJ1794.

### Введение

Предложенная в работе [1] методика проектирования объективов с однородными, градиентными и дифракционными элементами не является универсальной и ориентирована на конкретную технологию изготовления радиально-градиентных линз (РГЛ). Данная технология заключается во взаимной термической диффузии слоёв при спекании («ламинировании») многокомпонентной заготовки [2, 3]. Её существенный недостаток обусловлен ограниченностью ряда оптических материалов, использование которых для ламинируемых слоёв обеспечило бы выполнение рекомендаций разработчиков технологии ламинирования: во-первых, требуемое изменение показателя преломления от центра к краю РГЛ должно перекрываться не менее чем тремя-четырьмя слоями, а во-вторых, показатели преломления материалов этих слоёв должны быть распределены по возможности равномерно. При выполнении этих рекомендаций возможности управления дисперсионными свойствами РГЛ оказываются крайне ограниченными. Поэтому дисперсионные характеристики бесконечно тонкой модели толстой РГЛ, входящей в исходную схему объектива, используемые при решении апохроматизирующей системы уравнений, считаются заданными и неизменными. А соотношение оптических сил элементов исходной схемы, обеспечивающее апохроматизацию, существенно отличается от соответствующего соотношения объектива монохромата. В результате переход к полихроматическому излучению приводит к нарушению ранее достигнутой коррекции монохроматических aberrаций, что в конечном счёте ограничивает апертуру объектива [1].

Параллельно с технологией ламинирования в настоящее время быстро развиваются и другие технологии получения оптических материалов с градиентом показателя преломления. Они, в частности, включают нейтронное облучение; ионное наполнение; ионный обмен; вариации процессов на основе полимеров [4]. Особенно успешными сегодня являются химическое осаждение из газовой фазы (англ. Chemical Vapor Deposition, CVD-метод) [5], 3D-струйная печать с использованием нанокompозитных материалов, получивших название «оптических чернил» [6] и плазменное спекание многослойных порошков халькогенидных стёкол [7]. Учитывая несомненные достижения в рассматриваемой области, есть все основания полагать, что в ближайшем будущем у оптических элементов может быть реализовано произвольное распределение показателя преломления.

Цель настоящей статьи – представить методику проектирования объективов, включающих градиентную линзу, неоднородный материал которой моделируется двухкомпонентной линейной моделью. Из существующих сегодня технологий к ним, в частности, относятся 3D-струйная печать, CVD-технология и технология создания нанослоистых полимерных материалов.

### 1. Фокусирующие и дисперсионные свойства РГЛ, моделируемой двухкомпонентной линейной моделью

Простая двухкомпонентная линейная модель неоднородного композитного оптического материала предложена в работах [6, 8]. Эта модель предоставляет разработчику оптики возможность легко оценить число Аббе  $v_{\text{GIM}}$  и частную дисперсию  $P_{\text{GIM}}$  любых как реально существующих, так и гипотетических неоднородных материалов.

В рамках двухкомпонентной линейной модели показатель преломления композитного материала на длине волны  $\lambda$  и на расстоянии  $\rho$  от оптической оси описывается как линейная комбинация показателей преломления его компонентов:

$$N(\rho, \lambda) = C_1(\rho)n_1(\lambda) + C_2(\rho)n_2(\lambda), \quad (1)$$

где  $n_j(\lambda)$  – показатель преломления  $j$ -го компонента на длине волны  $\lambda$ ,  $C_j(\rho)$  – доля соответствующего компонента на расстоянии  $\rho$  от оптической оси. При этом

$$C_1(\rho) + C_2(\rho) = 1. \quad (2)$$

Величину  $C_j(\rho)$  можно принять за объёмную долю компонента  $j$  или считать относительной концентрацией компонента  $j$ .

Ниже, записав показатель преломления композитного материала в виде

$$N(\rho, \lambda) = N_{00}(\lambda) + N_{10}(\lambda)\rho^2 + N_{20}(\lambda)\rho^4 + N_{30}(\lambda)\rho^6 + \dots \quad (3)$$

[1], покажем, как в рамках двухкомпонентной модели базовый показатель преломления  $N_{00}(\lambda)$  и коэффициенты радиального градиента РГЛ  $N_{i0}(\lambda)$  при  $i > 0$  могут быть выражены через концентрации компонентов композитного материала. Распределения этих концентраций можно описать такими же рядами, и в частности,

$$C_2(\rho) = C_{00} + C_{10}\rho^2 + C_{20}\rho^4 + C_{30}\rho^6 + \dots \quad (4)$$

Так как уравнение (1) с учётом (2) может быть переписано в виде

$$N(\rho, \lambda) = n_1(\lambda) + C_2(\rho)(n_2(\lambda) - n_1(\lambda)), \quad (5)$$

то, комбинируя уравнения (3)–(5), можно получить следующие соотношения для коэффициентов полинома распределения показателя преломления:

$$\left. \begin{aligned} N_{i0}(\lambda) &= (n_2(\lambda) - n_1(\lambda))C_{i0} + n_1(\lambda), i = 0 \\ N_{i0}(\lambda) &= (n_2(\lambda) - n_1(\lambda))C_{i0}, i \neq 0 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Линейная модель композитного материала является наиболее простой и даёт удовлетворительный результат практически во всех случаях, поэтому она наиболее часто используется как для демонстрации хроматических свойств отдельных элементов, так и при расчёте оптических систем с такими элементами [8].

Если закон изменения показателя преломления РГЛ с неплоскими преломляющими поверхностями описывается формулой (3) при произвольном соотношении  $N_{i0}$  и  $N_{00}$ , то выражения для её оптической силы и дисперсионных характеристик громоздки и трудно поддаются анализу. В то же время если на РГЛ накладываются ограничения, описанные, в частности, в работе [8], то они приводят к разделению параметров, а главное – к описанию фокусирующих и дисперсионных свойств относительно простыми аналитическими выражениями. Указанные ограничения предполагают у РГЛ параболический закон изменения показателя преломления, т.е. в выражении (3)  $N_{i0}=0$  при  $i > 1$ . Кроме того, предполагается малый аргумент синуса, включающий коэффициенты  $N_{10}$  и  $N_{00}$ :

$$\sin(d\sqrt{-2N_{10}/N_{00}}) \approx d\sqrt{-2N_{10}/N_{00}} \leq 0,1. \quad (7)$$

В этом случае оптическая сила РГЛ приближённо равна сумме сил однородной линзы  $\varphi_{\text{HL}}$  (с показателем преломления  $N_{00}$ , осевой толщиной  $d$ , кривизнами преломляющих поверхностей  $c_1, c_2$ ) и  $\varphi_{\text{GIM}}$  – радиально-градиентной плоскопараллельной пластины (шайбы) толщиной  $d$ :

$$\varphi_{\text{RGL}} \approx \varphi_{\text{HL}} + \varphi_{\text{GIM}}, \quad (8)$$

где

$$\varphi_{\text{HL}} = (N_{00} - 1)(c_1 - c_2) + d(N_{00} - 1)^2 c_1 c_2 / N_{00}; \quad (9)$$

$$\varphi_{\text{GIM}} \approx -2dN_{10}. \quad (10)$$

Дисперсионная характеристика радиально-градиентной плоскопараллельной пластины, аналогичная числу Аббе, имеет вид [5, 8]

$$\nu_{\text{GIM}} = \Delta n_{\lambda_{\text{mid}}} / (\Delta n_{\lambda_{\text{short}}} - \Delta n_{\lambda_{\text{long}}}), \quad (11)$$

где  $\Delta n_{\lambda_{\text{short}}}$ ,  $\Delta n_{\lambda_{\text{mid}}}$  и  $\Delta n_{\lambda_{\text{long}}}$  – изменение показателя преломления от центра к краю РГЛ на трёх реперных длинах волн. Аналогично частная дисперсия может быть определена для неоднородного материала как [5, 8]

$$P_{\text{GIM}}(\lambda_k, \lambda_p) = (\Delta n_{\lambda_k} - \Delta n_{\lambda_p}) / (\Delta n_{\lambda_{\text{short}}} - \Delta n_{\lambda_{\text{long}}}), \quad (12)$$

где  $\lambda_{\text{short}} \leq \lambda_k < \lambda_p \leq \lambda_{\text{long}}$ .

Если предположить, как это обычно делается при апохроматической коррекции, что  $\lambda_k = \lambda_{\text{short}}$ ,  $\lambda_p = \lambda_{\text{mid}}$ , то выражение (11) приобретёт вид

$$P_{\text{GIM}}(\lambda_k, \lambda_p) = (\Delta n_{\lambda_{\text{short}}} - \Delta n_{\lambda_{\text{mid}}}) / (\Delta n_{\lambda_{\text{short}}} - \Delta n_{\lambda_{\text{long}}}). \quad (13)$$

В соответствии с двухкомпонентной линейной моделью композитного материала показатель преломления от центра РГЛ к её краю изменяется от значения, соответствующего первому компоненту материала, до соответствующего второму компоненту, т.е.  $\Delta n = n_2 - n_1$ . Следовательно, при известных значениях показателя преломления на краю и в центре РГЛ, т.е. при известных показателях преломления компонентов композитного материала на реперных длинах волн, выражения для  $\nu_{\text{GIM}}$  и  $P_{\text{GIM}}$  приобретают вид

$$\nu_{\text{GIM}} = \frac{n_{2,\lambda_{\text{mid}}} - n_{1,\lambda_{\text{mid}}}}{(n_{2,\lambda_{\text{short}}} - n_{1,\lambda_{\text{short}}}) - (n_{2,\lambda_{\text{long}}} - n_{1,\lambda_{\text{long}}})}, \quad (14)$$

$$P_{\text{GIM}} = \frac{(n_{2,\lambda_{\text{short}}} - n_{1,\lambda_{\text{short}}}) - (n_{2,\lambda_{\text{mid}}} - n_{1,\lambda_{\text{mid}}})}{(n_{2,\lambda_{\text{short}}} - n_{1,\lambda_{\text{short}}}) - (n_{2,\lambda_{\text{long}}} - n_{1,\lambda_{\text{long}}})}, \quad (15)$$

где индексы  $\lambda_{\text{mid}}$ ,  $\lambda_{\text{short}}$  и  $\lambda_{\text{long}}$  относятся к тем длинам волн, на которых зафиксированы показатели преломления первого и второго компонентов.

Дисперсионные характеристики РГЛ в целом можно получить исходя из применимой к модели градиентной линзы формы числа Аббе [8]

$$\nu = \varphi(\lambda_{\text{mid}}) / [\varphi(\lambda_{\text{short}}) - \varphi(\lambda_{\text{long}})]. \quad (16)$$

С учётом формулы (8) выражение (16) можно переписать в виде

$$\nu_{\text{RGL}} \approx \frac{\varphi_{\text{HL}}(\lambda_{\text{mid}}) + \varphi_{\text{GIM}}(\lambda_{\text{mid}})}{\Delta \varphi_{\text{HL}} + \Delta \varphi_{\text{GIM}}} \quad (17)$$

и, введя коэффициент, равный отношению составляющих оптических сил РГЛ

$$K = \varphi_{\text{GIM}}(\lambda_{\text{mid}}) / \varphi_{\text{HL}}(\lambda_{\text{mid}}), \quad (18)$$

для числа Аббе нетрудно получить

$$\nu_{\text{RGL}} \approx \nu_{\text{HL}} \nu_{\text{GIM}} (1 + K) / (\nu_{\text{GIM}} + K \nu_{\text{HL}}). \quad (19)$$

## 2. Компоновка и расчёт простейшего трёхлинзового объектива с РГЛ

Для проектирования простейшего трёхлинзового объектива с РГЛ предлагается методика, направленная на получение предельно возможных оптических характеристик у триплета, включающего одну РГЛ, размещённую между двумя однородными линзами. В соответствии с ней на первом этапе производится компоновка и расчёт высокоапертурного триплета-монокромата, за расчётную длину волны которого принимается центральная длина волны заданного спектрального диапазона. Но при этом оптические материалы линз триплета выбираются из условия обеспечения возможности на следующем этапе расчёта апохроматизации в этом спектральном диапазоне. Учитывая, что одним из наиболее широких рабочих спектральных диапазонов, представляющих сегодня наибольший интерес, является двойной инфракрасный (ИК) диапазон, предлагаемую методику

продемонстрируем на примере расчёта ИК-объектива. Его спектральный диапазон будет включать средневолновое (3,5–5 мкм) и длинноволновое (8–11,9 мкм) ИК-излучение, а в качестве матричного высокоразрешающего приёмника излучения будет использоваться современный неохлаждаемый микроболометр [9]. Здесь следует пояснить, что выбор границ рабочего спектрального диапазона был обусловлен совокупностью таких факторов, как спектральная чувствительность приёмника излучения, пропускание используемых оптических материалов и окна прозрачности атмосферы.

За расчётную длину волны ИК триплета-монохромата можно принять  $\lambda_{\text{mid}} = 6,5$  мкм. Очевидно, что в этом случае оптические характеристики объектива (при оптимальных формах преломляющих поверхностей линз, их толщинах и толщинах воздушных промежутков) будут зависеть лишь от показателей преломления однородных линз, распределения и перепада показателя преломления РГЛ на этой длине волны.

В качестве исходных материалов фронтальной и оконечной однородных линз целесообразно из специально составленного каталога прозрачных в двойном ИК-диапазоне стёкол выбрать два стекла, имеющих существенно различающиеся числа Аббе. Что же касается РГЛ, то, ориентируясь на технологию CVD, в качестве двух компонентов композитного материала можно принять комбинацию из разработанной серии новых марок халькогенидных стёкол NRL-1–NRL-23, прозрачных в широком диапазоне ИК-спектра (от 0,9 до 14 мкм). Показатель преломления этих стёкол охватывает интервал от 2,38 до 2,77, и при этом они обладают близкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения, а также совместимыми профилями вязкости [3, 10, 11].

В программе оптического проектирования ZEMAX [12], на которую ориентирована предлагаемая методика, РГЛ триплета-монохромата целесообразно моделировать поверхностью Gradient 3. Эта поверхность моделирует фронтальную (сфероидальную, параболическую или гиперболическую) поверхность градиентной линзы и неоднородный оптический материал, из которого линза выполнена. При этом распределение показателя преломления этого материала описывается полиномом 6-й степени от расстояния от оптической оси и 3-й степени от расстояния от вершины фронтальной поверхности вдоль оптической оси. В случае РГЛ ненулевыми коэффициентами в распределении показателя преломления поверхности Gradient 3 полагают только не зависящие от длины волны базовый показатель преломления и три коэффициента радиального градиента, т.е. коэффициенты  $N_{00} - N_{30}$  в выражении (3). Оставаясь в рамках линейной модели материала РГЛ для первого компонента, в качестве исходного целесообразно выбрать материал с большим показателем преломления.

Как показала практика расчётов, успех оптимизации объектива-монохромата обеспечивается параметрами асферических поверхностей линз и даже единственным (только  $N_{10}$ ) коэффициентом радиального градиента РГЛ. Здесь и ниже показателем успешной и завершённой оптимизации считается достижение заданного уровня дифракционной частотно-контрастной характеристики (модуляционной передаточной функции MTF в ZEMAX) в пределах рабочих интервалов пространственных частот и углов поля зрения.

Считая ненулевым только коэффициент  $N_{10}$ , для показателя преломления на периферии РГЛ ( $\rho = \rho_{\text{max}}$ ), а следовательно, для показателя преломления второго компонента нетрудно получить

$$n_{2,\lambda_{\text{mid}}} = n_{1,\lambda_{\text{mid}}} + N_{10}\rho_{\text{max}}^2. \quad (20)$$

Ограничение при оптимизации величины изменения показателя преломления от центра к краю РГЛ позволит определиться со вторым компонентом композитного материала. Тогда, используя дисперсионные формулы выбранных стёкол, приведённые в работе [10], нетрудно получить значения их показателей преломления на центральной и крайних длинах волн заданного спектрального диапазона.

Здесь следует обратить внимание на то, что по завершении каждого этапа оптимизации объектива-монохромата необходимо по формуле (20) найти показатель преломления второго компонента композитного материала РГЛ, а по нему из каталога халькогенидных стёкол NRL-1–NRL-23 подобрать ближайшее и вычислить значения его показателя преломления на трёх вышеуказанных длинах волн. Тогда формулы (14) и (15) дадут возможность вычислить число Аббе и коэффициент частной дисперсии радиально-градиентной плоскопараллельной пластины  $v_{\text{GIM}}$  и  $P_{\text{GIM}}$ .

Величина изменения показателя преломления от края к центру РГЛ, численно равная произведению  $N_{10}\rho_{\text{max}}^2$ , входящему в формулу (20), фокусные расстояния РГЛ и двух однородных линз, как и другие необходимые параметры оптимизированного объектива-монохромата, могут быть взяты из редакторов Zemax-файла объектива-монохромата, тогда формулы (9) и (10) позволят вычислить однородную  $f_{\text{HL}}$  и градиентную  $f_{\text{GIM}}$  составляющие оптической силы РГЛ. При этом число Аббе и коэффициент частной дисперсии однородной составляющей описываются известными формулами классической оптики [13]

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{HL}} &= \frac{(n_{1,\lambda_{\text{mid}}}-1)}{(n_{1,\lambda_{\text{short}}}-n_{1,\lambda_{\text{long}}})}, \\ P_{\text{HL}} &= \frac{(n_{1,\lambda_{\text{short}}}-n_{1,\lambda_{\text{mid}}})}{(n_{1,\lambda_{\text{short}}}-n_{1,\lambda_{\text{long}}})}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Используя формулу (18), формулу для частной дисперсии РГЛ

$$P_{\text{RGL}} \approx \frac{P_{\text{HL}}v_{\text{GIM}} + KP_{\text{GIM}}v_{\text{HL}}}{v_{\text{GIM}} + Kv_{\text{HL}}}, \quad (22)$$

а также выражения (14), (15), (21), можно получить обе дисперсионные характеристики РГЛ оптимизированного объектива-монокромата.

Как уже отмечалось выше, оптические материалы линз объектива-монокромата выбираются из условия обеспечения апохроматизации, т.е. равенства задних фокальных отрезков на крайних длинах волн  $\lambda_{\text{short}}$  и  $\lambda_{\text{long}}$  заданного спектрального диапазона фокальному отрезку на центральной длине волны  $\lambda_{\text{mid}}$ . Совокупность условий апохроматизации может быть записана в виде системы уравнений в достаточно простом виде в предположении, что апохроматизируемая оптическая схема состоит из тонких элементов, разделённых воздушными промежутками. Т.е. все три линзы объектива-монокромата следует заменить бесконечно тонкими элементами, разделёнными воздушными промежутками. Причём тонкий элемент, заменяющий РГЛ, должен иметь тот же самый хроматизм, что и у толстой градиентной линзы [14].

В результате апохроматизирующая система уравнений принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} h_1\varphi_1 + h_{\text{RGL}}\varphi_{\text{RGL}} + h_2\varphi_2 - h_1\Phi &= \delta_0, \\ h_1^2 \frac{\varphi_1}{v_1} + h_{\text{RGL}}^2 \frac{\varphi_{\text{RGL}}}{v_{\text{RGL}}} + h_2^2 \frac{\varphi_2}{v_2} &= \delta_1, \\ h_1^2 \frac{\varphi_1}{v_1^{(P)}} + h_{\text{RGL}}^2 \frac{\varphi_{\text{RGL}}}{v_{\text{RGL}}^{(P)}} + h_2^2 \frac{\varphi_2}{v_2^{(P)}} &= \delta_2 \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Здесь  $\varphi_i$  и  $h_i$  – оптические силы фронтальной и оконечной однородных линз и высоты падения апертурного параксиального луча на них;  $\varphi_{\text{RGL}}$  и  $h_{\text{RGL}}$  – оптическая сила тонкой модели РГЛ и высота падения апертурного параксиального луча на неё;  $\Phi$  – оптическая сила объектива в целом.

Все перечисленные выше оптические силы – это соответствующие параметры оптимизированного объектива-монокромата. Дисперсионные характеристики в системе уравнений (23)  $v_i^{(P)} = v_i/P_i$  и  $v_{\text{RGL}}^{(P)} = v_{\text{RGL}}/P_{\text{RGL}}$  – нормированные числа Аббе на относительные частные дисперсии однородных линз и РГЛ соответственно. Эти нормированные дисперсионные коэффициенты в соответствии с выражениями (19), (21) и (22) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} v_i^{(P)} &= \frac{v_i}{P_i} = \frac{(n_{\lambda_{\text{mid}}}-1)}{(n_{\lambda_{\text{short}}}-n_{\lambda_{\text{mid}}})} \\ v_{\text{RGL}}^{(P)} &= \frac{(1+K)v_{\text{HL}}v_{\text{GIM}}}{P_{\text{HL}}v_{\text{GIM}} + KP_{\text{GIM}}v_{\text{HL}}} \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Слабая зависимость дисперсионных коэффициентов РГЛ от соотношения кривизн её преломляющих поверхностей позволяет задавать в системе уравнений (23) модель реальной РГЛ, выполненной из известного градиентного материала, только оптической силой  $\varphi_{\text{RGL}}(\lambda_{\text{mid}})$  и дисперсионными коэффициентами.

Что же касается высот падения апертурного параксиального луча на бесконечно тонкие элементы  $h_i$ ,  $h_{\text{RGL}}$ , то их значения, удовлетворяющие первому уравнению системы (23), могут быть получены с использованием результатов расчёта прохождения апертурного параксиального луча через оптимизированный объектив-монокромат:

$$h_1 = h_1^{(Z)}; h_2 = Qh_2^{(Z)}; h_{\text{RGL}} = Qh_{\text{RGL}}^{(Z)}, \quad (25)$$

где

$$Q = \frac{h_1^{(Z)}(\Phi - \varphi_1)}{h_{\text{RGL}}^{(Z)}\varphi_{\text{RGL}} + h_2^{(Z)}\varphi_2}, \quad (26)$$

а  $h_i^{(Z)}$  и  $h_{\text{RGL}}^{(Z)}$  – высоты падения апертурного параксиального луча на первую поверхность соответствующей линзы объектива-монокромата. Эти высоты так же, как и другие необходимые параметры, могут быть взяты из редакторов Zemax-файла объектива-монокромата.

Таким образом, по завершении процесса оптимизации Zemax-файл объектива-монокромата может предоставить все необходимые данные для вычисления левых частей уравнений (23) и получения численных значений параметров  $\delta_0$  и  $\delta = (\delta_1^2 + \delta_2^2)^{0.5}$ . При этом параметр  $\delta_0$  используется лишь для контроля правильности вычисления высот  $h_i$  и  $h_{\text{RGL}}$ , а параметр  $\delta = (\delta_1^2 + \delta_2^2)^{0.5}$  оценивает степень апохроматизации. В идеальном случае  $\delta_0 = \delta = 0$ . Если же полученное значение параметра  $\delta$  превышает заданный уровень или требуется оценить его минимально достижимое значение, то из заранее составленного каталога выбирается другой оптический материал для любой из однородных линз и весь расчёт производится заново.

В результате на этом этапе расчёта будет получен и запомнен Zemax-файл оптимизированного объектива-монокромата с парой однородных оптических материалов, которая обеспечивает наиболее полную апохроматизацию, о чём свидетельствует наименьшее значение параметра  $\delta$ .

Если же это значение параметра  $\delta$  окажется неприемлемым, то для его снижения придётся выбрать другое халькогенидное стекло для первого компонента градиентного материала РГЛ и запустить весь процесс расчёта

заново. После завершения перебора оптических материалов окажется запомненным Zemax-файл оптимизированного объектива-монокромата с четвёркой оптических материалов, которая обеспечивает максимально достижимую апохроматизацию, о чём свидетельствует минимум миниморум значения параметра  $\delta$ . Автоматизировать весь процесс расчёта и перебора оптических материалов может позволить соответствующий макрос (подпрограмма на языке ZPL) для основной Zemax-программы объектива-монокромата. Совместно они должны работать следующим образом.

После очередного шага по стёклам, т.е. смены одного из стёкол (неважно, однородной линзы или РГЛ), должна производиться оптимизация объектива-монокромата по переменным параметрам (variable) из редактора параметров оптической схемы (Lens Data Editor). По достижении всеми MTF значений, равных или выше установленного уровня, в редакторе оценочной функции (Merit Function) значительная группа параметров объектива должна быть передана в макрос, где по ним вычисляются две составляющие  $\Phi_{HL}$ ,  $\Phi_{GM}$  оптической силы РГЛ; дисперсионные коэффициенты всех линз и высоты пересечения апертурным параксиальным лучом бесконечно тонких элементов апохроматизируемой оптической схемы. Полученные параметры подставляются в систему уравнений (23) и вычисляются значения невязок  $\delta_0$  и  $\delta$ . Если текущее значение  $\delta$  оказывается меньше запомненного предыдущего, то оно и Zemax-файл оптимизированного объектива-монокромата с марками всех четырёх стёкол и значениями переменных параметров, по которым производится оптимизация, запоминаются. Затем выбирается новое стекло и всё повторяется. После завершения перебора стёкол оказываются запомненными Zemax-файл оптимизированного объектива-монокромата с четвёркой оптических материалов, которая обеспечивает максимально достижимую апохроматизацию, о чём свидетельствует минимум миниморум значения параметра  $\delta$ .

Здесь необходимо отметить, что найденная лучшая (с точки зрения апохроматизации) четвёрка оптических материалов может оказаться не лучшей после перехода к полихроматическому излучению. Практика расчётов показывает, что это связано с уровнем и возможностью устранения сферохроматизма на этапе оптимизации. Поэтому целесообразно сохранять несколько решений со значениями параметра  $\delta$ , близкими к минимуму миниморум.

Следующим этапом расчёта объектива с РГЛ является переход к полихроматическому излучению. Для этого в редакторе данных запомненного Zemax-файла оптимизированного объектива-монокромата устанавливается набор длин волн, соответствующий рабочему спектральному диапазону, а поверхность Gradient 3, моделирующая РГЛ, заменяется на поверхность Gradient 6, отличающуюся от поверхности Gradient 3 тем, что её неоднородный материал имеет только радиальный градиент, а каждый из коэффициентов  $N_{00}(\lambda) - N_{40}(\lambda)$  в выражении (3) является функцией длины волны

$$N_{q0}(\lambda) = A_q + B_q \lambda^2 + \frac{C_q}{\lambda^2} + \frac{D_q}{\lambda^4}, \quad (27)$$

где  $q = 0, 1, \dots, 4$ ;  $A_q - D_q$  – спектральные коэффициенты;  $\lambda$  – длина волны в нанометрах.

Значения базового показателя преломления  $N_{00}(\lambda_i)$  и первого коэффициента радиального градиента  $N_{10}(\lambda_i)$  на трёх длинах волн рабочего спектрального диапазона ( $\lambda_1 = \lambda_{\text{short}}$ ,  $\lambda_2 = \lambda_{\text{mid}}$ ,  $\lambda_3 = \lambda_{\text{long}}$ ) позволяют получить найденные ранее халькогенидные стёкла первого и второго компонентов градиентного материала РГЛ:

$$N_{00}(\lambda_i) = n_1(\lambda_i), \quad (28)$$

$$N_{10}(\lambda_i) = \frac{n_2(\lambda_i) - n_1(\lambda_i)}{\rho_{\text{max}}^2}. \quad (29)$$

С использованием же формулы (27), включающей известные значения коэффициентов  $N_{00}(\lambda_i)$  и  $N_{10}(\lambda_i)$  и записанной для дискретных длин волн, нетрудно составить и решить две системы ( $q = 0, 1$ ) из трёх ( $i = 1, 2, 3$ ) линейных уравнений. В результате этого получить спектральные коэффициенты  $A_q - C_q$  и  $D_q = 0$  для каждого из параметров  $N_{q0}(\lambda_i)$ . Эти спектральные коэффициенты следует занести в файл GLC.DAT каталога Glasscat программы оптического проектирования ZEMAX, дав название смоделированному неоднородному материалу.

Завершающей операцией расчёта объектива является оптимизация по кривизнам и асферичности поверхностей всех линз, а также по толщинам линз и воздушным промежуткам. Использование вышеописанной методики и программы оптического проектирования Zemax с соответствующим макросом показало, что наилучшей четвёркой оптических материалов из представленных каталогов для ИК-триплета с РГЛ оказались:

- для однородных линз IRG27-I ( $n_{\lambda_{\text{mid}}} = 2,4069$ ;  $v = 29,535$ ) и IIR-SF1 ( $n_{\lambda_{\text{mid}}} = 2,7698$ ;  $v = 15,340$ );
- для РГЛ – NRL-16 ( $n_{\lambda_{\text{mid}}} = 2,5714$ ;  $v = 43,966$ ) и NRL-15 ( $n_{\lambda_{\text{mid}}} = 2,5404$ ;  $v = 41,419$ ).

Ближайшей к наилучшей явилась четвёрка, отличающаяся от наилучшей только материалом первой однородной линзы – AMTIR3 ( $n_{\lambda_{\text{mid}}} = 2,6129$ ;  $v = 50,734$ ) вместо IRG27-I. Однако последующая оптимизация показала, что халькогенидное стекло AMTIR3 позволяет получить значительно большую светосилу и контраст в изображении, формируемом ИК-триплетом. Его оптическая схема представлена на рис. 1, а конструктивные параметры – в табл. 1 и табл. 2.

Все поверхности линз в этих двух таблицах (за исключением поверхности №3) представляют собой так называемые чётные асферические поверхности, описываемые в ZEMAX уравнением

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{p=2} \alpha_p \rho^{2p}, \quad (30)$$

где  $z(\rho)$  – координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстояние  $\rho$  в системе координат, плоскость  $XOY$  которой касается вершины этой поверхности;  $c$  – кривизна поверхности в её вершине;  $k$  – коническая постоянная;  $\alpha_p$  – коэффициенты асферичности поверхности.

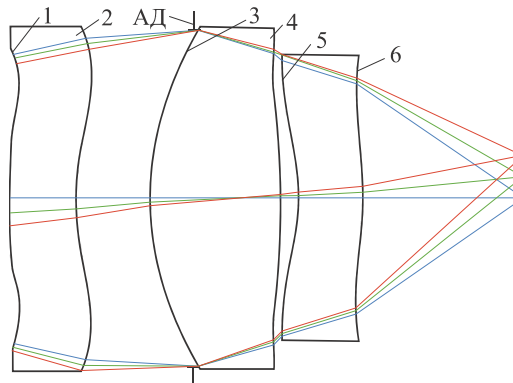


Рис. 1. Оптическая схема ИК-триплета: 1, 2 и 5, 6 – преломляющие поверхности однородных линз; АД – апертурная диафрагма; 3, 4 – преломляющие поверхности РГЛ

Табл. 1. Основные конструктивные параметры объектива

| Номер поверхности | Радиус $r$ , мм | Толщина $d$ , мм | Оптический материал |
|-------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| ПП*               | $\infty$        | $\infty$         | –                   |
| 1                 | 52,765          | 10,565           | AMTIR3              |
| 2                 | 36,462          | 18,278           | –                   |
| АД**              | $\infty$        | –6,788           | –                   |
| 3                 | 45,984          | 20,003           | NRLMACR             |
| 4                 | –94,678         | 2,956            | –                   |
| 5                 | –33,724         | 10,005           | IRR-SF1             |
| 6                 | –58,457         | 24,988           | –                   |
| ПИ***             | $\infty$        | 0                | –                   |

\* ПП – плоскость предмета;

\*\* АД – апертурная диафрагма диаметром 52,7 мм;

\*\*\* ПИ – плоскость изображения.

Табл. 2. Дополнительные характеристики поверхностей объектива

| Номер поверхности | Коническая постоянная $k$ | Коэффициент асферичности      |                               |                               |                               |                               |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                   |                           | $\alpha_2$ , мм <sup>-3</sup> | $\alpha_3$ , мм <sup>-5</sup> | $\alpha_4$ , мм <sup>-7</sup> | $\alpha_5$ , мм <sup>-9</sup> | $\alpha_6$ , мм <sup>-9</sup> |
| 1                 | 0                         | $-1,3221 \times 10^{-5}$      | $-5,1105 \times 10^{-9}$      | $1,7229 \times 10^{-12}$      | $-5,1503 \times 10^{-15}$     | $4,7228 \times 10^{-19}$      |
| 2                 | 0                         | $-2,4802 \times 10^{-5}$      | $6,1356 \times 10^{-9}$       | $9,9122 \times 10^{-13}$      | $-2,6878 \times 10^{-15}$     | $-9,1765 \times 10^{-20}$     |
| 3                 | –0.812                    | 0                             | 0                             | 0                             | 0                             | 0                             |
| 4                 | 0                         | $1,2506 \times 10^{-5}$       | $-9,3449 \times 10^{-9}$      | $2,1546 \times 10^{-14}$      | $-4,0586 \times 10^{-15}$     | $1,3092 \times 10^{-17}$      |
| 5                 | 0                         | $4,2584 \times 10^{-5}$       | $-6,3856 \times 10^{-8}$      | $7,1471 \times 10^{-11}$      | $-3,6039 \times 10^{-14}$     | $1,6265 \times 10^{-17}$      |
| 6                 | 0                         | $2,1265 \times 10^{-5}$       | $6,7545 \times 10^{-9}$       | $-7,6939 \times 10^{-11}$     | $1,0071 \times 10^{-13}$      | $6,9905 \times 10^{-17}$      |

Заднее фокусное расстояние рассчитанного ИК-триплета  $f' = 40$  мм, а угловое поле зрения  $2\omega = 19,5^\circ$ . При диафрагменном числе, равном 0,88, в двойном ИК-диапазоне (3,5–5 мкм и 8–11,9 мкм) он на пространственной частоте Найквиста предполагаемого матричного высокоразрешающего приёмника излучения  $N_N = 30$  мм<sup>-1</sup> формирует изображение по всему полю с контрастом  $T \geq 0,56$ . Продольный габарит объектива, т.е. расстояние от фронтальной плоскости до плоскости изображения, равен 80,0 мм. Максимальный хроматизм положения благодаря апохроматической коррекции меньше 34,1 мкм при дифракционном пределе 20 мкм, а дисторсия не превышает 1 %.

Представленные результаты показывают, что при использовании вышеизложенной методики коррекция хроматизма, как правило, уже не приводит к серьёзному нарушению ранее достигнутой коррекции полевых aberrаций, что позволяет обеспечить высокое качество изображения при значительной светосиле.

### Заключение

Представленная в настоящей статье методика проектирования объективов-апохроматов с РГЛ предполагает, что её неоднородный оптический материал может быть получен одной из таких аддитивных технологий, как 3D-

струйная печать, химическое осаждение из газовой фазы или технология создания нанослоистых полимерных материалов. Общим для этих технологий является возможность успешного описания получаемого неоднородного материала в рамках двухкомпонентной линейной модели.

В рамках этой модели получены использующиеся в представленной методике формулы для дисперсионных характеристик РГЛ. Сама же методика направлена на получение предельно возможных оптических характеристик у простых по конструкции объективов с градиентными линзами. Использование предлагаемой методики демонстрируется на примере компоновки и расчёта триплета, включающего одну РГЛ, размещённую между двумя однородными линзами. Отличительной особенностью представленной методики является то, что уже на первоначальном этапе расчёта объектива-монокромата обеспечивается будущая апохроматизация, сопровождающая переход к полихроматическому излучению. Это достигается сочетанием оптимизации по конструктивным параметрам объектива-монокромата с соответствующим подбором двух компонентов компензитного материала РГЛ и оптических материалов двух однородных линз.

Даны рекомендации по использованию программы оптического проектирования ZEMAX для оптимизации и специализированного пользовательского макроса (подпрограммы на языке ZPL) для перебора оптических материалов и оценки степени достигнутой апохроматизации.

Эффективность представленной методики и рекомендаций по её практическому использованию демонстрирует рассчитанный ИК-триплет с задним фокусным расстоянием  $f' = 40$  мм и угловым полем зрения  $2\omega = 19,5^\circ$ . При относительном отверстии 1:0,88 и в двойном ИК-диапазоне (3,5–5 и 8–11,9 мкм) он формирует изображение по всему полю с контрастом  $T \geq 0,56$  на пространственной частоте  $N_N = 30$  мм<sup>-1</sup>. Максимальный хроматизм положения меньше 34,1 мкм при дифракционном пределе 20 мкм, а дисторсия не превышает 1 %. Этот результат подтверждает, что при использовании представленной методики апохроматизация не сопровождается сколь-нибудь серьёзным нарушением коррекции полевых aberrаций, что позволяет обеспечить высокое качество изображения при значительной светосиле.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию № FSGS-2024-0005.

### References

- [1] Greisukh GI, Levin IA, Ezhov EG. Methodology for designing infrared objectives with homogeneous, gradient-index and diffractive elements [in Russian]. *Opticheskii Zhurnal* 2025; 92(3): 68-78. doi:10.17586/1023-5086-2025-92-03-68-78.
- [2] Bayya S, Gibson D, Nguyen V, eds. Design and fabrication of multispectral optics using expanded glass map. *Proc SPIE* 2015; 9451: 94511N. doi:10.1117/12.2177289.
- [3] Gibson D, Bayya S, Nguyen V, eds. IR GRIN optics for imaging. *Proc SPIE* 2016; 9822: 98220R. doi:10.1117/12.2224094.
- [4] Corsetti JA. Design of ZnS/ZnSe gradient-index lenses in the mid-wave infrared and design, fabrication, and thermal metrology of polymer radial gradient-index lenses. [PhD thesis]. Rochester, NY: University of Rochester; 2017.
- [5] Williams GM, Harmon JP. Dispersion controlled nanocomposite gradient index lenses. *Opt Continuum* 2023; 2(2): 456-472. doi:10.1364/OPTCON.481205.
- [6] Zheng W, Xia K, Jia G, Xie S, eds. Customized linear refractive index GRIN prepared by rapid sintering of multilayer chalcogenide glass powders. *J Am Ceram Soc* 2024; 107(7): 4585-4593. doi:10.1111/jace.19780.
- [7] McCarthy PW. Gradient-index materials, design, and metrology for broadband imaging systems. [PhD thesis]. Rochester, NY: University of Rochester; 2015.
- [8] Yang T, Lippman DH, Chou RY, eds. Material optimization in the design of broadband gradient-index optics. *Proc SPIE, International Optical Design Conference 2013*; 12078: 120780Z. doi:10.1117/12.2603644.
- [9] ASTRON-64017-2 microbolometer array sensor. Available at: <https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/>.
- [10] Beadie G, Stover E, Gibson D. Temperature-dependent dispersion fitting for a recent infrared glass catalog. *Proc SPIE, Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR IV* 2019; 10998: 1099804. doi:10.1117/12.2518494.
- [11] Gibson D, Bayya S, Nguyen V, eds. GRIN optics for multispectral infrared imaging. *Proc SPIE, Infrared Technology and Applications XLI* 2015; 9451: 94511P. doi:10.1117/12.2177136.
- [12] ZEMAX: software for optical system design. Available at: <https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio>.
- [13] Zakaznov NP, ed. Theory of optical systems: a tutorial [in Russian]. St. Petersburg: Lan; 2022. ISBN: 978-5-8114-0822-1.
- [14] Greisukh GI, Levin IA, Ezhov EG. Modeling of a radial laminated GRIN lens; design and achievable performance of a dual-band infrared triplet with such lens. *J Opt Technol* 2024; 91(10): 660-664. doi:10.1364/JOT.91.000660.

### Сведения об авторах

**Грейсух Григорий Исаевич**, 1943 года рождения. В 1965 году окончил Пензенский политехнический институт по специальности «Радиотехника». Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук (1990 год), профессор. Работает заведующим кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является почетным членом Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Г.И. Грейсух – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и



градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 250 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств и 2 патента. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru)

**Левин Илья Анатольевич**, 1987 года рождения. В 2009 году окончил Пензенский государственный университет по специальности 01.07.01 «Физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год), работает ведущим инженером-конструктором отдела разработки и проектирования объективов ТНП и ГП ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». И.А. Левин – специалист в области расчёта оптических систем. В списке научных работ И.А. Левина свыше 20 статей и 9 патентов. E-mail: [i.a.levin@mail.ru](mailto:i.a.levin@mail.ru)

**Ежов Евгений Григорьевич**, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 г.) и профессор-консультант НИС Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Специалист в области расчёта оптических систем, математического моделирования и защиты информации. В списке научных работ Е.Г. Ежова свыше 80 статей, учебник и 2 патента. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru)

---

*Поступила в редакцию 01 августа 2025 г. Окончательный вариант – 07 октября 2025 г.*

---

---

# Methodology for designing objectives including a gradient lens modeled by a two-component linear model

G.I. Greisukh<sup>1</sup>, I.A. Levin<sup>2</sup>, E.G. Ezhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Penza State University of Architecture and Construction, Titova Str. 28, Penza, 440028, Russia;

<sup>2</sup> PJSC "S.A. Zverev Krasnogorsk Plant", Rechnaya Str. 8, Krasnogorsk, 143403, Russia

## Abstract

The paper presents a technique for designing apochromat objectives with a single radial gradient-index lens the nonhomogeneous optical material of which can be obtained using an additive technology and successfully described within the framework of a two-component linear model. In this model, formulas used in the presented methodology for the dispersion characteristics of radial gradient-index lenses are obtained. The technique itself is aimed at obtaining the highest possible optical characteristics in structurally simple lenses. A distinctive feature of the presented technique is that already at the initial stage of calculating the monochromatic objective, future apochromatization is provided, which accompanies the transition to polychromatic radiation. This is achieved by combining optimization in terms of the design parameters of the monochromatic objective with the appropriate selection of two components of the composite material of gradient-index lens and optical materials of two homogeneous lenses. Recommendations are given on the use of the ZEMAX optical design program for optimization and a specialized user macro for sorting optical materials and evaluating the degree of achieved apochromatization. The effectiveness of the presented technique and recommendations for its practical use are demonstrated by the results of calculating an infrared triplet, which forms an image over the entire field with a contrast of at least 0.56 at a spatial frequency of 30 1/mm with a  $F/\# = 0.88$  and in the double spectral range (3.5-5 and 8-11.9 microns). This result confirms that, when using the proposed technique, apochromatization is not accompanied by any serious violation of the field aberration correction achieved at the monochromatic design stage, thus ensuring high image quality at a large numerical aperture.

**Keywords:** additive technology, radial gradient-index lens, two-component linear model, apochromatic objective, design methodology.

**Citation:** Greisukh GI, Levin IA, Ezhov EG. Methodology for designing objectives including a gradient lens modeled by a two-component linear model. *Computer Optics* 2026; 50(3): 1794. doi: 10.18287/COJ1794.

**Acknowledgements:** The investigation was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the government project FSGS-2024-0005.

---

## Author's information

**Grigoriy Isaevitch Greisukh** (b. 1943) graduated (1965) from Penza Polytechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of Russian Higher School. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from the Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of the Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greisukh is D. S. Rozhdestvensky Optical Society member. His current research interests include design of optical system, diffractive and gradient-index optics. He is co-author of 250 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru)

**Il'ya Anatolievich Levin** (b. 1987) graduated (2009) from Penza State University, majoring in Physics. He is Ph.D (2013). He works as a leading design engineer of Development and Design of Lenses for TNP and GP department PJSC "Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev". I.A. Levin is a specialist in the field of design of optical systems. The list of scientific works by I.A. Levin includes 15 articles and 9 patents. E-mail: [i.a.levin@mail.ru](mailto:i.a.levin@mail.ru)

**Eugeni Grigorievich Ezhov** (b. 1977) graduated (1999) from the Penza State University majoring in Radio Engineering. He is Doctor of Physical and Mathematical Sciences (2008) and consulting professor of Scientific Research department of Penza State University of Architecture and Construction. His current research interests include design of optical systems, mathematical modeling, and data security. He is coauthor over 80 scientific papers, tutorial and 2 patents. E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru)

---

*Received August 01, 2025. The final version – October 07, 2025*

---