

## ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОБОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОРЯДКОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Грейсх Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Сидякина З.А., Степанов С.А.  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

### Аннотация

Исследовано влияние побочных дифракционных порядков на визуально оцениваемое качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой. Показано, что если микроструктура дифракционной линзы, используемой в оптической системе, имеет пилообразный профиль, а вариации яркостей регистрируемых системой сцен не являются экстремальными, то побочные дифракционные порядки практически не снижают частотно-контрастную характеристику системы, а гало не оказывает сколь-нибудь существенного негативного влияния на визуальное восприятие изображения.

**Ключевые слова:** дифракционная линза, рельефно-фазовая микроструктура, побочные дифракционные порядки, качество изображения.

### Введение

Включение в оптическую систему, состоящую из рефракционных линз, одиночной дифракционной линзы (ДЛ) позволяет (благодаря уникальным фокусирующим и абберационным свойствам последней) существенно упростить конструкцию системы и одновременно получить высокие оптические характеристики. Это справедливо как для оптических систем, сопряжённых с квазимонохроматическими источниками излучения [1–5], так и для систем, рассчитанных на использование полихроматического излучения [6–13]. В частности, при использовании ДЛ достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, можно, используя ограниченный набор оптических материалов, например, технологичные и коммерчески доступные оптические пластмассы [14–17].

Однако дифракционный механизм преобразования волнового фронта на микроструктуре ДЛ, помимо положительных особенностей оптических элементов данного типа, порождает одну из основных проблем, существенно ограничивающих практическое использование ДЛ в изображающих оптических системах. Эта проблема связана с тем, что при использовании ДЛ в таких системах на изображение, сформированное излучением, дифрагированным на микроструктуре линзы в рабочий порядок дифракции, накладывается паразитное излучение, сформированное за счёт дифракции на этой же микроструктуре в побочные дифракционные порядки.

Степень и характер влияния побочных дифракционных порядков ДЛ на качество изображения, формируемого гибридной рефракционно-дифракционной оптической системой (т.е. системой, включающей наряду с рефракционными линзами и ДЛ), помимо распределения дифракционной эффективности (ДЭ) по порядкам, зависит от того, насколько расфокусированными являются изображения, формируемые в побочных порядках. Это, в свою очередь, определяется двумя факторами: во-первых, долей, которую составляет оптическая сила ДЛ в рабочем дифракционном порядке, от оптической силы системы в целом; во-

вторых, величиной сферической абберации, которую вносит ДЛ в формируемый в рабочем дифракционном порядке волновой фронт. В настоящей статье исследуется влияние побочных дифракционных порядков в случае, когда и расфокусировка, и сферическая абберация достаточно велики, так что диаметры расфокусированных изображений точечного источника как минимум на порядок превышают диаметр изображения этого источника, сформированного в рабочем порядке дифракции. Такая ситуация имеет место, в частности, при формировании изображения пластмассовой гибридной асферической линзой (ГАЛ) Plastic Hybrid Aspheric Lens No 5-999, серийно производимой фирмой Edmund Optics [18]. Поэтому исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, проводились с использованием именно этого оптического элемента.

### Исследования и результаты

ГАЛ, оптическая схема которой представлена на рис. 1, выполнена из оптической пластмассы Zeonex E48R и имеет асферическую и сферическую преломляющие поверхности.

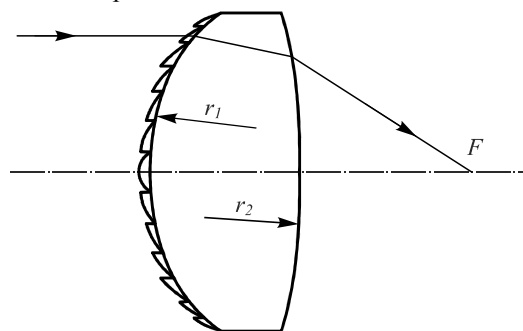


Рис. 1. Оптическая схема Plastic Hybrid Aspheric Lens No 65-999: радиус кривизны при вершине асферической поверхности  $r_1=12,5$  мм, радиус сферической поверхности  $r_2=-48,3$  мм; осевая толщина  $d=3,3$  мм; световой диаметр  $D=10$  мм

Рельефно-фазовую пилообразную дифракционную микроструктуру ДЛ несёт, как показано на рис. 1, асферическая поверхность. Фазовая задержка, вносимая микроструктурой ДЛ в падающий волновой

фронт  $\psi$ , и её фокусное расстояние  $f'_{дл}$  описываются соответственно уравнениями [19]

$$\psi = mA_1\rho^2, \tag{1}$$

$$f'_{дл} = -\pi/mA_1\lambda. \tag{2}$$

В этих уравнениях  $m$  – номер порядка дифракции,  $\rho$  – расстояние, отсчитываемое от оптической оси, а коэффициент  $A_1 = -16,411 \text{ мм}^{-2}$ .

Эффективное фокусное расстояние ГАЛ на длине волны жёлтой d-линии гелия ( $\lambda_d = 0,58756 \text{ мкм}$ )  $f' = 18,025 \text{ мм}$ , а фокусное расстояние ДЛ в рабочем +1-м порядке дифракции  $f'_{дл} = 325,8 \text{ мм}$ . Сферическая аберрация ГАЛ полностью устранена (не превышает  $0,001\lambda$ ) на длине волны  $\lambda_d$  для осевого точечного источника, удалённого в бесконечность со стороны ДЛ. Глубина пилообразного рельефа микроструктуры ДЛ выбрана из условия обеспечения максимальной ДЭ, близкой к 100 %, именно на этой длине волны. Микроструктура в пределах светового диаметра включает 65 зон Френеля. Здесь напомним, что применительно к пилообразной рельефно-фазовой микроструктуре ДЛ под термином «зона Френеля» понимается участок микроструктуры, в пределах которого фазовая задержка, вносимая микроструктурой в падающий на неё волновой фронт, изменяется от 0 до  $2\pi$  [1, 20]. Ширина любой из указанных 65 зон Френеля не меньше  $\Lambda_{\min} = 40 \text{ мкм}$ . Глубина же рельефа в соответствии с формулой [1]

$$h = \lambda_d / (n_d - 1) \tag{3}$$

составляет  $h = 1,106 \text{ мкм}$ , т.к. показатель преломления пластмассы Zeonex E48R на длине волны  $\lambda_d$   $n_d = 1,5311$  [21]. При вышеуказанном числе зон Френеля и при  $\Lambda_{\min}/h > 36$  реальная ДЭ, которая может быть оценена путём численного решения уравнений Максвелла, практически совпадает с оценкой, получаемой в рамках скалярной теории дифракции и в приближении бесконечно тонкого транспаранта [22, 23]. Поэтому ниже для оценки ДЭ в различных дифракционных порядках будем использовать выражение, полученное в скалярном приближении и приведённое, например, в [22]:

$$\eta_m = \left\{ \frac{\sin [\pi(\Delta l/\lambda - m)]}{\pi(\Delta l/\lambda - m)} \right\}^2, \tag{4}$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего на структуру света,  $\Delta l$  – приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля, и в нашем случае  $\Delta l = h(n - 1)$ , а  $n$  – показатель преломления пластмассы на длине волны  $\lambda$ .

ГАЛ ахроматизирована для видимого спектрального диапазона, ограниченного синей F- и красной C-линиями водорода ( $\lambda_{\min} = \lambda_F = 0,48613 \text{ мкм}$  и  $\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,65626 \text{ мкм}$ ). Поэтому в табл. 1 приведены значения ДЭ для ряда дифракционных порядков именно на этих длинах волн. Одновременно значения ДЭ

приведены и на длине волны He-Ne лазера ( $\lambda_{\text{HeNe}} = 0,6328 \text{ мкм}$ ), на которой также проводились исследования. Дифракционные порядки выше пятого в таблицу не включены и при анализе не учитывались, т.к. их энергетический вклад пренебрежимо мал.

Табл. 1. Распределение дифракционной эффективности пилообразной рельефно-фазовой микроструктуры по порядкам дифракции на трёх длинах волн

Номер дифракционного порядка, $m$	ДЭ на длине волны		
	$\lambda = \lambda_F$	$\lambda = \lambda_{\text{HeNe}}$	$\lambda = \lambda_C$
+1	0,8457	0,9817	0,9612
0	0,02828	0,006436	0,0145
-1	0,00857	0,001486	0,00322
+2	0,07032	0,00477	0,00935
-2	0,004076	0,000644	0,00138
+3	0,0134	0,00128	0,0026
-3	0,002374	0,000358	0,00076
+4	0,0055	0,000582	0,0019
-4	0,00155	0,000227	0,00048
+5	0,00297	0,000332	0,000682
-5	0,00109	0,000157	0,000345

Для отдельного наблюдения изображений бесконечно удалённого точечного источника, формируемых ГАЛ в различных порядках дифракции, круговая периферийная зона линзы диаметром 1,5 мм освещалась параллельным и нормально падающим пучком He-Ne лазера. Как работает периферийный участок ДЛ в различных порядках дифракции, условно показано на рис. 2. Фото экспериментальной установки, собранной на интерферометрическом столе типа «СИН», представлено на рис. 3, а картина, зарегистрированная видеокамерой и воспроизведённая монитором компьютера, приведена на рис. 4.

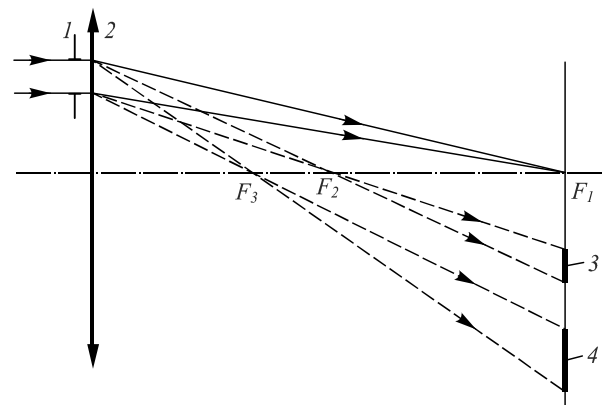


Рис. 2. Схема формирования и сдвига расфокусированных изображений в +1-м, +2-м и +3-м порядках дифракции: 1 – вносековая апертурная диафрагма; 2 – ДЛ; F<sub>1</sub>-F<sub>3</sub> – задние фокусы ДЛ в соответствующих порядках дифракции; 3, 4 – расфокусированные изображения, формируемые в +2-м и +3-м порядках дифракции

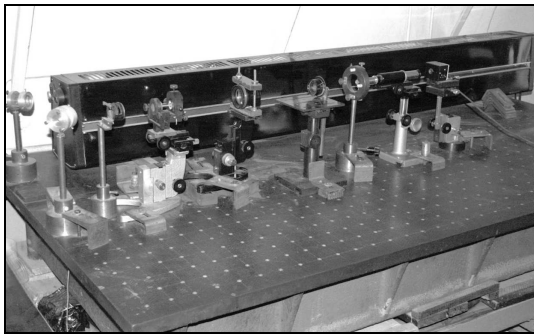


Рис. 3. Экспериментальная установка, собранная на интерферометрическом столе типа «СИН» и позволяющая передавать формируемую картину для исследования в компьютер

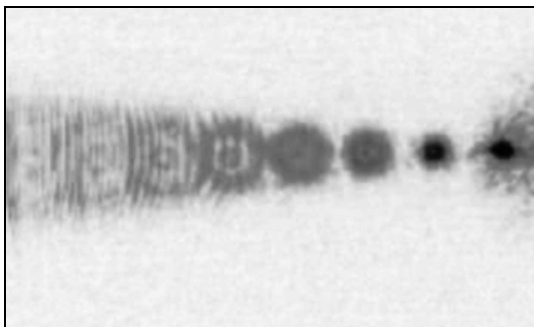


Рис. 4. Изображения бесконечно удалённого точечного источника, сформированные ГАЛ в восьми (от  $t=+8$  до  $t=+1$ ) порядках дифракции (номера порядков убывают слева направо); контраст изображений в соответствии с типографскими требованиями инвертирован

Сразу же отметим, что одновременная регистрация матричным фотоприёмником изображений, яркости которых отличаются друг от друга на много порядков, достигается благодаря их пространственному разделению и соответствующему выбору интенсивности падающего на ГАЛ пучка. В результате пиксели, воспринимающие расфокусированные изображения высоких порядков, работают в линейном режиме, а пиксели, воспринимающие сфокусированное изображение первого порядка, – в режиме насыщения.

Расфокусировка изображений растёт с номером и положительными, и отрицательными дифракционных порядков, т.к. с ростом номера растёт модуль приращения эффективного фокусного расстояния ГАЛ.

Картина, представленная на рис. 4, хорошо согласуется с картиной рассеяния лучей, формируемой компьютерной программой оптического проектирования Zemax [24] и представленной на рис. 5.

Оценка качества изображения протяжённого объекта, формируемого ГАЛ, производилась по частотно-контрастной характеристике (ЧКХ), вычислявшейся компьютерной программой Zemax, а также экспериментально с использованием тест-объекта. В качестве последнего использовалась штриховая мира ЛКТБ ЛОЭП «Светлана». Она подобна широко используемому за рубежом тест-объекту Resolving Power Test Target USAF 1951 [25] (см. рис. 6), но уменьшена по сравнению с оригиналом так, что число пар линий на миллиметр в нулевой группе больше,

чем в оригинале в 100 раз. В результате число пар линий на миллиметр в любом трёхшпальном элементе использовавшейся миры определяется выражением

$$N_{G,E} = 100 \cdot 2^{(G+(E-1)/6)}, \tag{5}$$

где  $G$  – номер группы элементов (на рис. 6  $G$  принимает значения 0 и 1), а  $E$  – номер элемента (на рис. 6  $E$  изменяется от 1 до 6).

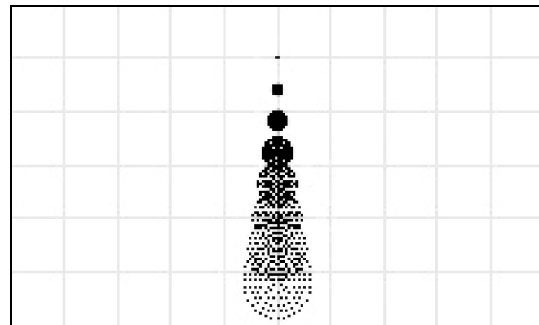


Рис. 5. Диаграмма рассеяния лучей, построенная компьютерной программой оптического проектирования Zemax

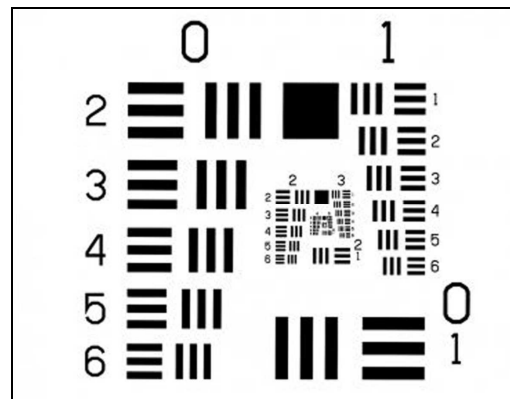


Рис. 6. Мира Resolving Power Test Target USAF 1951, включающая шпалы 0-й и 1-й групп с элементами от 1 до 6

Мира устанавливалась перпендикулярно оптической оси ГАЛ со стороны сферической поверхности, её центр размещался на оптической оси, а расстояние между мирой и фронтальной поверхностью ГАЛ (передний отрезок) выбирался близким к эффективному фокусному расстоянию ГАЛ:  $s = -18,3$  мм. Это обеспечивало приемлемое для анализа изображения линейное увеличение  $\beta = -8,81$  при сферической аберрации на длине волны  $\lambda_d$  в плоскости наилучшей установки для этой длины волны, не превышающей  $0,05\lambda$ . Мира освещалась осветителем с лампой накаливания (температура спирали 3200 К) через ультрафиолетовый и инфракрасный фильтр UV&IR Cut Filter [26] со спектральной полосой пропускания от  $\lambda = 0,42$  мкм до  $\lambda = 0,68$  мкм. В результате относительная интенсивность в излучении, падающем на миру, лежала в интервале от 0,17 (на длине волны  $\lambda = 0,42$  мкм) до 1,0 (на длине волны  $\lambda = 0,68$  мкм). На длинах волн, для которых ГАЛ ахроматизировалась, относительная интенсивность составляла 0,38 (на  $\lambda_F$ ) и 0,95 (на  $\lambda_C$ ).

В изображении миры, сформированном ГАЛ на ПЗС-матрице и наблюдаемом на экране компьютера

(рис. 7), хорошо разрешаются шпалы элемента 6 группы 0. В соответствии с формулой (5) пространственная частота первой гармоники в этом элементе  $N_{0,6} = 178$  лин/мм (ширина шпал и промежутков между ними – 2,81 мкм).

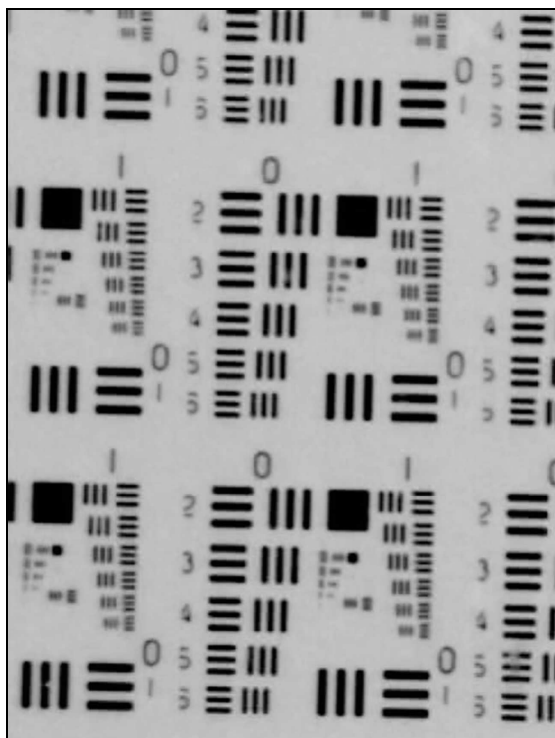


Рис. 7. Изображение штриховой миры ЛКТБ ЛОЭП «Светлана», сформированное ГАЛ, зарегистрированное видеокамерой и воспроизведённое монитором компьютера (контраст изображения в соответствии с типографскими требованиями инвертирован)

Несколько хуже разрешаются шпалы элемента 1 группы 1. Пространственная частота первой гармоники в этом элементе  $N_{1,1} = 200$  лин/мм (ширина шпал и промежутков между ними – 2,5 мкм). В плоскости изображения все размеры в  $|\beta| = 8,81$  раз больше, а частоты в это же число раз меньше и частоте  $N_{0,6}$  соответствуют 20,2 лин/мм, а частоте  $N_{1,1}$  соответствуют 22,7 лин/мм.

Здесь отметим, что разрешение как в изображении, передаваемом ПЗС-матрицей в компьютер, так и в изображении, наблюдаемом на экране монитора, полностью определяется ГАЛ, т.к. разрешающая способность ПЗС-матрицы и монитора компьютера как минимум на порядок превышает частоту следования шпал в соответствующем изображении миры.

Полихроматическая ЧКХ, рассчитанная с помощью компьютерной программы Zemax для пространственных частот 20 и 23 лин/мм при учёте только +1-го рабочего дифракционного порядка, даёт значения контраста 0,28 и 0,24 соответственно. Полихроматическая ЧКХ, учитывающая все дифракционные порядки (вплоть до  $m = \pm 5$ ), даёт практически не отличающиеся значения контраста. Это объясняется тем, что ввиду ощутимой оптической силы ДЛ в составе ГАЛ изображения, формируемые в побочных дифракционных порядках, оказываются настолько расфокуси-

рованными, что в совокупности с низкой ДЭ в этих порядках создают очень слабый и практически равномерный фон, практически не влияющий на контраст сфокусированного изображения, формируемого в рабочем дифракционном порядке. Данный вывод подтверждается качеством представленного на рис. 6 изображения и хорошим совпадением расчётных и полученных экспериментально контрастов.

Вновь обращаясь к рис. 6, отметим, что светлопольный квадратный элемент миры позволяет оценить влияние гало, появление которого обусловлено наличием побочных дифракционных порядков, на визуальное восприятие изображения, формируемого ГАЛ. В изображении, представленном на рис. 7, гало отсутствует. С целью определения условий его появления увеличивалась освещённость миры. Эта освещённость доводилась до уровня, при котором существенно снижались контраст в изображении миры из-за того, что излучение, проходящее через её хромовый слой, существенно превышало порог чувствительности ПЗС-матрицы. Однако и в этом случае гало не наблюдалось. Обнаружить его можно, если заменить миру непрозрачным экраном с ярко освещённым малоразмерным отверстием. Сопоставив изображения такого отверстия, сформированные ГАЛ и одиночной рефракционной линзой, с сопоставимыми фокусным расстоянием и световым диаметром, можно сделать вывод, что появление гало обусловлено как рассеянием света на оправках оптических элементов, так и дифракцией света в побочные порядки ДЛ.

### Заключение

Экспериментальные результаты, представленные в настоящей статье, продемонстрировали соответствие визуального восприятия расчётной оценке качества полихроматического изображения, формируемого исследованной рефракционно-дифракционной оптической системой. При этом гало, обусловленное дифракцией света в побочные порядки ДЛ, может оказать ощутимое негативное влияние на восприятие изображения сцен только с весьма высокими вариациями яркостей, которые, как правило, перекрывают динамический диапазон матричных фотоприёмников мобильных телефонов и массовых видеокамер наблюдения. Следовательно, побочные дифракционные порядки пилообразной рельефно-фазовой структуры не являются препятствием для использования ДЛ в объективах подобных устройств.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания вузу в сфере научной деятельности.

### Литература

1. **Бобров, С.Т.** Оптика дифракционных элементов и систем / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух, Ю.Г. Туркевич. – Л.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
2. **Greisukh, G.I.** Optics of diffractive and gradient-index elements and systems / G.I. Greisukh, S.T. Bobrov, S.A. Stepanov. – Bellingham: SPIE Press, 1997. – 414 p.

3. **Грейсух, Г.И.** Анализ возможностей ахроматизации оптических систем, состоящих из дифракционных элементов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 187-193.
4. **Greisukh, G.I.** Design of the double-telecentric high-aperture diffractive-refractive objectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2011. – Vol. 50(19). – P. 3254-3258.
5. **Грейсух, Г.И.** Потенциальные возможности ахроматизированных дифракционных и дифракционно-рефракционных систем фокусировки рентгеновского излучения / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82(3). – С. 99-103.
6. **Ган, М.А.** Теория и методы расчёта голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
7. **Mercado, R.I.** The design of apochromatic optical systems / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1985. – V. 554. – P. 217-227.
8. **Stone, T.** Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // Applied Optics. – 1988. – V. 27. – P. 2960-2971.
9. **Maxwell, J.** Tertiary spectrum manipulation in apochromats / J. Maxwell // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – V. 1354. – P. 408-411.
10. **Mercado, R.I.** Designs of two-glass apochromats and superachromats / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – V. 1354. – P. 263-272.
11. **Greisukh, G.I.** Diffractive-Refractive Hybrid Corrector for Achromatic and Apochromatic Corrections of Optical Systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2006. – V. 45(24). – P. 6137-6141.
12. **Грейсух, Г.И.** Дифракционно-рефракционный корректор третичного спектра / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77(9). – С. 22-29.
13. **Грейсух, Г.И.** Моделирование и исследование суперахроматизации рефракционных и рефракционно-дифракционных оптических систем / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, А.В. Калашников, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 395-404.
14. **Greisukh, G.I.** Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2010. – V. 49(23). – P. 4379-4384.
15. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.V. Kalashnikov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2012. – V. 51(20). – P. 4597-4604.
16. **Greisukh, G.I.** Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, Z.A. Sidiyakina, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2013. – V. 52(23). – P. 5843-5850.
17. **Грейсух, Г.И.** Расчёт и анализ компактного пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного вариообъектива / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 210-214.
18. Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200>.
19. **Geary, J.M.** Introduction to lens design: with practical ZEMAX examples / J.M. Geary. – Richmond: Willmann-Bell, Inc., 2002. – 462 p.
20. **Коронкевич, В.П.** Современные зонные пластинки / В.П. Коронкевич, И.Г. Пальчикова // Автотметрия. – 1992. – № 1. – С. 85-100.
21. Optical Component and Lens Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.zeonex.com/optical\\_plastic.asp](http://www.zeonex.com/optical_plastic.asp).
22. **Грейсух, Г.И.** Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсух, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106(4). – С. 694-699.
23. **Грейсух, Г.И.** Эффективность рельефно-фазовых дифракционных элементов при малом числе зон Френеля / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.В. Калашников, И.А. Левин, С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 113(4). – С. 468-473.
24. ZEMAX: software for optical system design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radiantzemax.com>
25. 1951 USAF resolution test chart [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/1951\\_USAF\\_resolution\\_test\\_chart](http://en.wikipedia.org/wiki/1951_USAF_resolution_test_chart).
26. HOYA FILTERS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hoyafilter.com/hoya/products/generalfilters/uvircut/>.

### References

1. **Bobrov, S.T.** Optics of diffractive elements and systems / S.T. Bobrov, G.I. Greisukh, Yu.G. Turkevich. – L.: Mashinostroenie, 1986. – 223 p. – (In Russian).
2. **Greisukh, G.I.** Optics of diffractive and gradient-index elements and systems / G.I. Greisukh, S.T. Bobrov, S.A. Stepanov. – Bellingham: SPIE Press, 1997. – 414 p.
3. **Greisukh, G.I.** Optical systems with diffractive elements: ways of the chromatism correction / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov // Computer Optics. – 2010. – Vol. 34(2). – P. 187-193. – (In Russian).
4. **Greisukh, G.I.** Design of the double-telecentric high-aperture diffractive-refractive objectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2011. – V. 50(19). – P. 3254-3258.
5. **Greisukh, G.I.** Potentialities of achromatized diffractive and diffractive-refractive X-ray focusing systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kasin, S.A. Stepanov // Technical Physics. – 2012. – V. 57(3). – P. 410-414.
6. **Ган, М.А.** Theory and design methods of the hologram and kinoform optical elements / М.А. Ган. – Leningrad: "GOI" Publisher, 1984. – 140 p. – (In Russian).
7. **Mercado, R.I.** The design of apochromatic optical systems / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1985. – V. 554. – P. 217-227.
8. **Stone, T.** Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // Applied Optics. – 1988. – V. 27. – P. 2960-2971.
9. **Maxwell, J.** Tertiary spectrum manipulation in apochromats / J. Maxwell // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – V. 1354. – P. 408-411.
10. **Mercado, R.I.** Designs of two-glass apochromats and superachromats / R.I. Mercado // International Lens Design Conference, SPIE. – 1990. – V. 1354. – P. 263-272.
11. **Greisukh, G.I.** Diffractive-Refractive Hybrid Corrector for Achromatic and Apochromatic Corrections of Optical Systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2006. – V. 45(24). – P. 6137-6141.
12. **Greisukh, G.I.** Diffraction-refraction corrector of the tertiary spectrum / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kasin, S.A. Stepanov // Journal of Optical Technology. – 2010. – V. 77(9). – P. 542-547.
13. **Greisukh, G.I.** Modeling and investigation superachromatization refractive and refractive-diffractive optical systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, A.V. Kalashnikov, S.A. Stepanov // Computer Optics. – 2012. – V. 36 (3). – P. 395-404. – (In Russian).
14. **Greisukh, G.I.** Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2010. – V. 49(23). – P. 4379-4384.
15. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.V. Kalashnikov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2012. – V. 51(20). – P. 4597-4604.
16. **Greisukh, G.I.** Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum /

- G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, Z.A. Sidiyakina, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52(23). – P. 5843-5850.
17. **Greisukh, G.I.** Design and analysis of the compact plastic refractive-diffractive zoom lens / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, Z.A. Sidiyakina, S.A. Stepanov // *Computer Optics*. – 2013. – V. 37(2). – P. 210-214. – (In Russian).
  18. Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses [Electronic resource]. – Access mode : <http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200>
  19. **Geary, J.M.** Introduction to lens design: with practical ZEMAX examples / J.M. Geary. – Richmond: Willmann-Bell, Inc., 2002. – 462 p.
  20. **Koronkevich, V.P.** Modern zone plates / V.P. Koronkevich, I.G. Palchikova // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 1992. – Vol. 1. – P. 86-101.
  21. Optical Component and Lens Applications [Electronic resource]. – Access mode : [http://www.zeonex.com/optical\\_plastic.asp](http://www.zeonex.com/optical_plastic.asp)
  22. **Greisukh, G.I.** Suppression of the Spectral Selectivity of Two-Layer Relief-Phase Diffraction Structures / G.I. Greisukh, E.A. Bezus, D.A. Bykov, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // *Optics and Spectroscopy*. – 2009. – V. 106(4). – P. 692-697.
  23. **Greisukh, G.I.** The efficiency of relief-phase diffractive elements at a small number of Fresnel zones / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, A.V. Kalashnikov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Optics and Spectroscopy*. – 2012. – V. 113(4). – P. 425-430.
  24. ZEMAX: software for optical system design [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.radiantzemax.com>
  25. 1951 USAF resolution test chart [Electronic resource]. – Access mode: [http://en.wikipedia.org/wiki/1951\\_USAF\\_resolution\\_test\\_chart](http://en.wikipedia.org/wiki/1951_USAF_resolution_test_chart)
  26. HOYA FILTERS [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.hoyafilter.com/hoya/products/generalfilters/uvircut1991>. – 1232 p. – (In Russian).

## VISUAL ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ADVERSE DIFFRACTION ORDERS ON THE QUALITY OF IMAGE FORMED BY THE REFRACTIVE - DIFFRACTIVE OPTICAL SYSTEM

*G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, Z.A. Sidiyakina, S.A. Stepanov*  
*Penza State University of Architecture and Construction*

### Abstract

Adverse impact of the diffraction orders on visually assess the quality of the image formed by refractive-diffractive optical system is investigated. It is shown that if the microstructure of diffractive lenses used in the optical system has a saw-tooth profile and brightness variations in the photographed scenes that are not extreme, the adverse diffraction orders practically not reduce of the system's frequency-contrast characteristic, and the halo does not have any significant negative impact for visual perception of the image.

**Key words:** diffractive lens, relief-phase microstructure, adverse diffraction orders, image quality.

### 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 членом Европейского оптического общества (EOS) и 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 130 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств.

E-mail: [grev@pguas.ru](mailto:grev@pguas.ru).

**Grigoriy Isaevich Greisukh** (b. 1943) graduated (1965) from Penza Polytechnical Institute, majoring in Radio Engineering. He is the deserved worker of the Russian higher school. He received his Doctor in Technical (1990) degrees from Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics. He is chief of the Physics and Chemistry department of Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greisukh is EOS and 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 130 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions.



**Ежов Евгений Григорьевич**, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 год), доцент. Работает профессором кафедры информационных систем и компьютерного моделирования 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 50 статей и учебник.

E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Eugeny Grigorievich Ezhov** (b. 1977) graduated (1981) from Penza State University, majoring in Radio Engineering. He received his Doctor in Physics & Maths (2008) degrees from Samara State Aerospace University. His current research interests include design of optical systems, mathematical modeling, and data security. He is co-author over 50 scientific papers and tutorial.



**Казин Сергей Владимирович**, 1988 года рождения. В 2010 году окончил Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по специальности «Информационные системы и технологии». Кандидат физико-математических наук (2012 год), научный сотрудник кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ С.В. Казина 12 публикаций.

E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

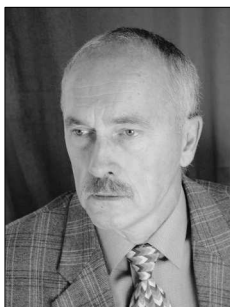
**Sergey Vladimirovich Kazin** (b. 1988) graduated (2010) from Penza State University of Architecture and Construction, majoring in Information Systems and Technologies. He received his Candidate in Physics & Maths (2012) degrees from Samara State Aerospace University. He is researcher of the Physics and Chemistry department of Penza State University of Architecture and Construction. He is co-author of 12 publications.



**Сидякина Зоя Александровна**, 1980 года рождения. В 2002 году окончила Пензенский государственный педагогический университет по специальности «Учитель математики и физики». Ассистент кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ З.А. Сидякиной 5 публикаций.

E-mail: [grey@pguas.ru](mailto:grey@pguas.ru).

**Zoya Aleksandrovna Sidiyakina** (b. 1980) graduated (2002) from Penza State Pedagogical University on a speciality «Mathematics Teacher and Physicists». She is assistant of Physics and Chemistry department of Penza State University of Architecture and Construction. She is co-author of 5 publications.



**Степанов Сергей Алексеевич**, 1951 года рождения. В 1974 году окончил Куйбышевский государственный университет (ныне – Самарский государственный университет) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (1999 г.), профессор (2001 г.), работает профессором кафедры физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. С.А. Степанов – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова более 80 статей, 2 монографии, 5 авторских свидетельств.

E-mail: [asut@pguas.ru](mailto:asut@pguas.ru).

**Sergei Alekseevich Stepanov** (b. 1951) graduated (1974) from Kuibyshev State University (presently, Samara State University), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (1999) degrees from Samara State Aerospace University, professor (2001). He is professor of the Physics and Chemistry department of Penza State University of Architecture and Construction. He is a EOS and 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 more 80 scientific papers, 2 monographs, and 5 inventions.

---

*Поступила в редакцию 29 апреля 2014 г.*