УДК 535.42

ВЛИЯНИЕ ПОБОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОРЯДКОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННЫМ ОБЪЕКТИВОМ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ

© 2016 г.
Г. И. Грейсух, доктор техн. наук; **Е. Г. Ежов**, доктор физ.-мат. наук; **С. В. Казин**, канд. физ.-мат. наук; **С. А. Степанов**, доктор физ.-мат. наук

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

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

Экспериментально исследовано влияние побочных дифракционных порядков на качество цветного изображения, формируемого рефракционно-дифракционным объективом цифровой фотокамеры. Определены требования к дифракционной эффективности однослойной однорельефной пилообразной микроструктуры дифракционной линзы, исключающей влияние на качество изображения ореола (гало), формируемого побочными порядками.

Ключевые слова: *дифракционная эффективность, дифракционная линза, рельефно-фазовая микроструктура.*

Коды OCIS: 050.1970, 160.4670, 160.4890

Поступила в редакцию 03.06.2015

Введение

Рефракционно-дифракционные оптические системы (ОС), т.е. системы, которые наряду с рефракционными линзами включают дифракционную линзу (ДЛ), обладают рядом существенных достоинств. В частности, в таких ОС можно достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, при использовании ограниченного набора оптических материалов, например, технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс [1–4]. Однако дифракционный механизм преобразования волнового фронта на микроструктуре ДЛ в рефракционно-дифракционных ОС приводит к наложению паразитного излучения, сформированного за счет дифракции на этой же микроструктуре (МС) в побочные дифракционные порядки, на изображение, сформированное излучением, дифрагированным на МС ДЛ в рабочий порядок дифракции.

Экспериментальной оценке влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной ОС, посвящена, в частности, работа [5]. В ней на основе использования тест-объектов в виде штриховой миры и непрозрачного экрана с малоразмерным отверстием была проведена оценка влияния побочных дифракционных порядков на появление цветного ореола (гало) и снижение оптической передаточной функции системы. В данной работе продолжено экспериментальное исследование влияния побочных дифракционных порядков на качество формируемого изображения. Целью работы является определение условий, при которых допустимо использование в изображающей рефракционно-дифракционной ОС, сопряженной с матричным фотоприемником, ДЛ с однослойной МС, а при каких – необходимо использовать МС с несколькими слоями и рельефами. Последнее позволяет существенно снизить интенсивность побочных дифракционных порядков благодаря уменьшению зависимости дифракционной эффективности (ДЭ) ДЛ от длины волны и угла падения излучения на МС [6, 7].

Исследования и результаты

Исследования, описываемые в настоящей статье так же, как и исследования, описанные в работе [5], проводились с рефракционно-дифракционным объективом, представляющим

собой пластмассовую гибридную асферическую линзу (ГАЛ) *Plastic Hybrid Aspheric Lens* No 5-999, серийно выпускаемую фирмой *Edmund Optics* [8]. Оптическая схема ГАЛ представлена на рис. 1. Линза выполнена из оптической пластмассы *Zeonex* E48R и имеет асферическую и сферическую преломляющие поверхности. При этом кольцевая дифракционная МС, выполненная на асферической поверхности ГАЛ и играющая роль ДЛ, имеет небольшую оптическую силу и вводится в объектив с целью коррекции хроматизма, а также для содействия коррекции превалирующих монохроматических аберраций.

Эффективное фокусное расстояние ГАЛ на длине волны желтой d-линии гелия (λ_d = 587,56 нм) f' = 18,025 мм, а фокусное расстояние ДЛ в рабочем +1-ом порядке дифракции f'_{DL} = 325,8 мм. У осевого точечного источника, удаленного в бесконечность со стороны ДЛ, на длине волны λ_d сферическая аберрация ГАЛ полностью устранена (не превышает 0,001λ). Глубина пилообразного рельефа МС 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 МС ДЛ под термином “зона Френеля” понимается участок МС, в пределах которого фазовая задержка, вносимая МС в падающий на нее волновой фронт, изменяется от 0 до 2π [9–11]. Ширина любой из указанных 65 зон Френеля не менее Λ_{min} = 40 мкм. Глубина рельефа в соответствии с формулой [9, 10]

$$h = \lambda_d/(n_d - 1) \qquad (1)$$

составляет h = 1,106 мкм, так как показатель преломления n_d пластмассы *Zeonex* E48R на длине волны λ_d равен 1,53117 [12]. При приведенном выше количестве зон Френеля и в случае (Λ_{min}/h) > 36 реальная ДЭ, которая может быть оценена путем численного решения уравнений Максвелла, практически совпадает с оценкой, получаемой в рамках скалярной теории дифракции и в приближении бесконечно тонкого транспаранта [6, 7]. Поэтому ниже для оценки ДЭ в различных дифракционных порядках будем использовать выражение, полученное в скалярном приближении и приведенное, например, в работе [6] –

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

где λ – длина волны падающего на МС света, Δl – приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля (в данном случае $\Delta l = (n - 1)h$, n – показатель преломления материала МС на длине волны λ).

ГАЛ ахроматизирована в видимом спектральном диапазоне, ограниченном синей F- и красной C-линиями водорода ($\lambda_{min} = \lambda_F$ = 486,13 и $\lambda_{max} = \lambda_C$ = 656,26 нм), а просветляющее покрытие пилообразной МС ДЛ обеспечивает коэффициент отражения R_{avg} = 0,75% в спектральном диапазоне 425 $\leq \lambda \leq$ 675 нм. График ДЭ представлен на рис. 2.

В качестве матричного фотоприемника использовалась цветная матрица ПЗС ICX638BKA формата 1/3″ с количеством эффективных пикселов 0,38М и диагональю 6 мм [13]. Выбор малоформатной матрицы обусловлен тем, что из-за значительных полевых аберраций ГАЛ может формировать изображение с достаточно высоким разрешением только в пределах малого углового поля 2$\omega \leq 4°$.

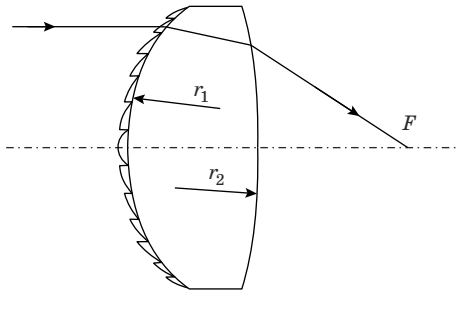

Рис. 1. Оптическая схема *Plastic Hybrid Aspheric Lens* No 65-999. Радиус кривизны при вершине асферической поверхности r_1 = 12,5 мм, радиус сферической поверхности r_2 = –48,3 мм, осевая толщина d = 3,3 мм, световой диаметр D = 10 мм.

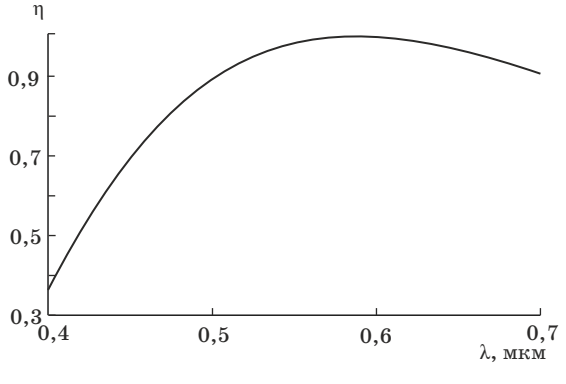

Рис. 2. Распределение ДЭ МС ГАЛ по длинам волн в первом рабочем порядке дифракции.

В качестве тест-объектов использовались две матовые белые шпалы на фоне плоского экрана, покрытого черным бархатом, а также малоразмерное отверстие ирисовой диафрагмы (см. рис. 3). Тест-объекты устанавливались перпендикулярно оптической оси ГАЛ со стороны ДЛ на асферической поверхности, а расстояние между объектом и фронтальной поверхностью ГАЛ, т.е. передний отрезок, выбирался равным $s = -1000$ мм. Такой отрезок обеспечивал угловое поле $2\omega \leq 3°$, приемлемое для анализа изображения линейное увеличение и волновую аберрацию в плоскости наилучшей установки, не превышающую 5λ. Двушпальный тест-объект освещался рассеянным солнечным светом (освещенность в его плоскости составляла 500–700 лк), а отверстие ирисовой диафрагмы – проходящим светом люминесцентной лампы дневного света (освещенность в плоскости отверстия – 1300 лк).

Перед ГАЛ устанавливались светофильтры нижних частот [14–16], длины волн среза которых и соответствующие им ДЭ микроструктуры ГАЛ сведены в таблицу. У всех использованных светофильтров пропускание на длинноволновой границе видимого спектрального диапазона

Характеристики использованных светофильтров и соответствующие ДЭ МС ГАЛ

Шифр	Светофильтр нижних частот		ДЭ в первом рабочем порядке дифракции	
	$\lambda_{0,01}$ – длина волны среза по уровню пропускания 0,01, нм	$\lambda_{0,5}$ – длина волны среза по уровню пропускания 0,5, нм	на $\lambda_{0,01}$	на $\lambda_{0,5}$
ЖС3	400	437	0,38	0,62
ЖС12	430	450	0,57	0,69
ЖС17	470	490	0,78	0,86
ЖС18	490	510	0,86	0,92

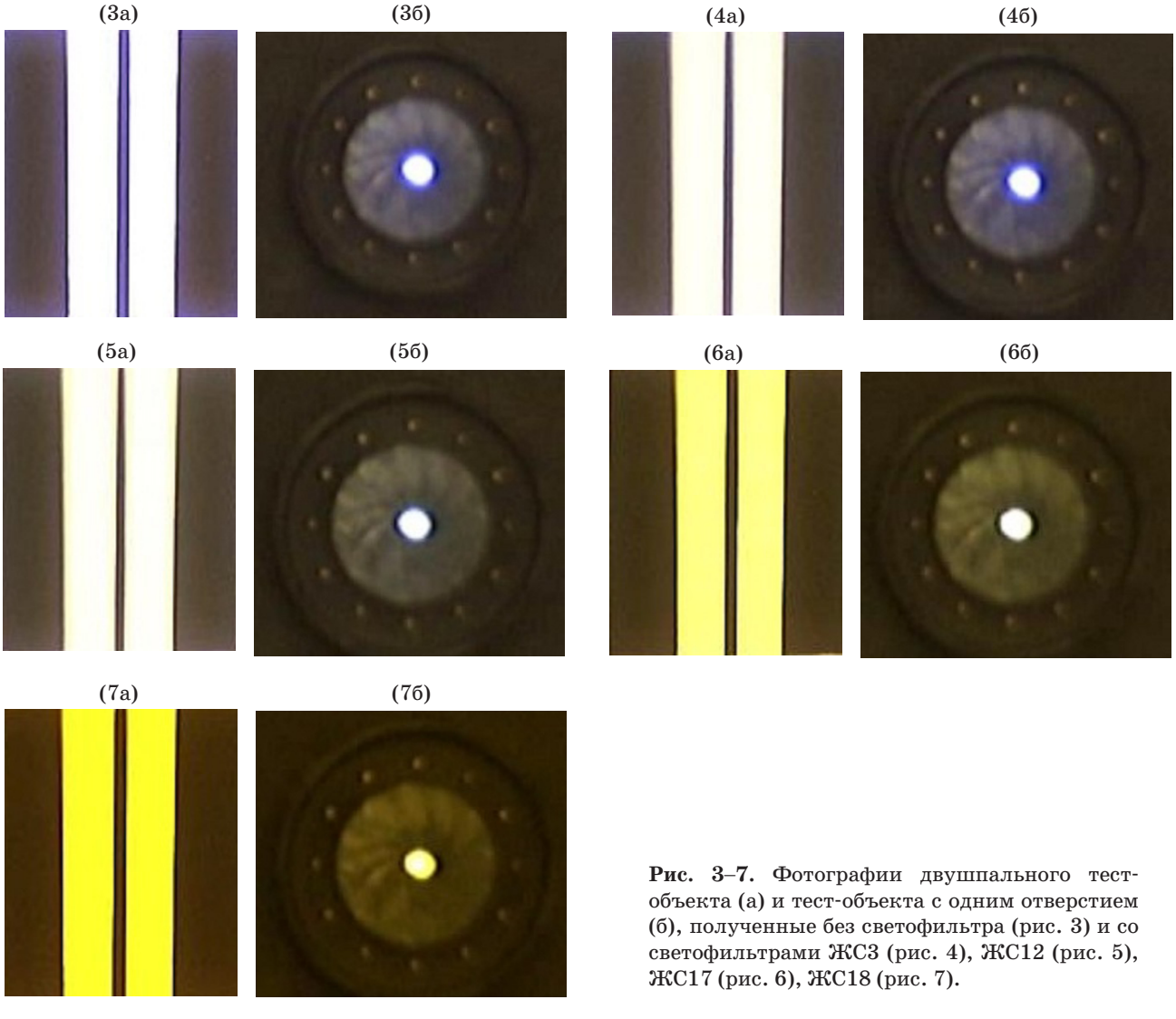

Рис. 3–7. Фотографии двушпального тест-объекта (а) и тест-объекта с одним отверстием (б), полученные без светофильтра (рис. 3) и со светофильтрами ЖС3 (рис. 4), ЖС12 (рис. 5), ЖС17 (рис. 6), ЖС18 (рис. 7).

(λ = 700 нм) превышает 0,96, а ДЭ МС ГАЛ, как следует из рис. 2, не опускается ниже 0,9.

Фотографии изображений тест-объектов, сформированных ГАЛ на матрице ПЗС и наблюдаемых на экране компьютера, представлены на рис. 3–7. Сразу же заметим, что все фото двушпального тест-объекта получены при экспозиции, лежащей на линейном участке экспозиционной кривой вблизи точки насыщения, а фото ярко освещенного отверстия – при экспозиции, лежащей за точкой насыщения. О последнем, в частности, свидетельствует практическая независимость цвета отверстия от типа используемого при съемке светофильтра.

Кадры (а) и (б) рис. 3 показывают, что в отсутствии светофильтра, когда изображение на матрице ПЗС формируется излучением всего видимого спектрального диапазона, контуры изображения окаймляются цветным ореолом (гало) преимущественно фиолетово-синего тона. Установка светофильтра ЖС3, отсекающего фиолетовое излучение (в спектральном диапазоне, ограниченном длинами волн среза этого светофильтра ДЭ МС ГАЛ находится в пределах $0{,}38 \leq \eta \leq 0{,}62$), незначительно снижает ореол. Замена светофильтра ЖС3 на светофильтр ЖС12, отсекающий помимо фиолетового излучения и коротковолновую часть синего излучения (в спектральном диапазоне, ограниченном длинами волн среза этого светофильтра, ДЭ МС ГАЛ лежит в пределах $0{,}57 \leq \eta \leq 0{,}69$), приводит к дальнейшему уменьшению ореола. Наконец, установка светофильтров ЖС17 или ЖС18, отсекающих те коротковолновые области видимого излучения, в которых значение ДЭ в спектральном диапазоне, ограниченном соответствующими длинами волн среза, в пределах $0{,}78 \leq \eta \leq 0{,}92$, устраняет ореол полностью.

Описанное выше достигнуто, в частности, благодаря высокой ДЭ ($\eta > 0{,}9$) в длинноволновой области видимого спектрального диапазона ($600 \leq \lambda \leq 700$ нм). Обобщая полученный результат, можно констатировать, что ореол (гало) будет гарантировано отсутствовать, если в пределах используемого спектрального диапазона кривая ДЭ ДЛ будет иметь выпуклую форму, а ее характерные точки удовлетворять следующим условиям: $\eta \approx 1$ в одной из точек внутри спектрального диапазона, $\eta \geq 0{,}85$ на одном из его краев и $\eta \geq 0{,}9$ – на другом.

Заключение

Отсутствие цветного ореола в представленных на рис. 6–7 изображениях свидетельствует о том, что если в пределах используемого спектрального диапазона кривая ДЭ ДЛ имеет выпуклую форму, а ее характерные точки удовлетворяют условиям $\eta \approx 1$ в одной из точек внутри спектрального диапазона, $\eta \geq 0{,}85$ на одном из его краев и $\eta \geq 0{,}9$ на другом, то побочные дифракционные порядки однослойной однорельефной пилообразной МС не окажут негативного воздействия на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной ОС. Причем это справедливо во всем интервале освещенностей, которые рекомендуются для фотосъемки любительскими цифровыми камерами.

В профессиональной художественной фотографии, где к качеству изображения предъявляются более высокие требования и, в частности, к отношению сигнал/шум в цветном изображении, разумным представляется требование достижения ДЭ не ниже 0,95 в пределах всего видимого спектрального диапазона и рабочих полевых углов. Столь высокая ДЭ может быть достигнута только у рельефно-фазовых ДЛ с двух- и трехслойной МС [7, 16, 17].

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

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A.* Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives // Appl. Opt. 2010. V. 49. № 23. P. 4379–4384.

2. *Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Левин И.А., Степанов С.А.* Расчет пластмассово-линзовых микрообъективов суперахроматов // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 4. С. 473–479.

3. *Greisukh G.I., Ezhov E.G., Levin I.A., Kalashnikov A.V., Stepanov S.A.* Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses // Appl. Opt. 2012. V. 51. № 20. P. 4597–4604.

4. *Greisukh G.I., Ezhov E.G., Sidyakina Z.A., Stepanov S.A.* Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum // Appl. Opt. 2013. V. 52. № 23. P. 5843–5850.

5. *Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Сидякина З.А., Степанов С.А.* Визуальная оценка влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 418–424.

6. *Грейсух Г.И., Безус Е.А., Быков Д.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А.* Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых структур // Опт. спектр. 2009. Т. 106. № 4. С. 694–699.

7. *Greisukh G.I., Danilov V.A., Ezhov E.G., Levin I.A., Stepanov S.A., Usievich B.A.* Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth // Opt. Commun. 2015. V. 338. P. 54–57.

8. Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200

9. *Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич. Ю.Г.* Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.

10. *Greisukh G.I., Bobrov S.T., Stepanov S.A.* Optics of diffractive and gradient-index elements and systems. Bellingham: SPIE Press, 1997. 414 p.

11. *Коронкевич В.П., Пальчикова И.Г.,* Современные зонные пластинки // Автометрия. 1992. № 1. С. 85–100.

12. ZEMAX: software for optical system design, http://www.radiantzemax.com

13. Цветные ПЗС-матрицы, http://www.promelec.ru/lines/sony/color-matrix/

14. Спектральные характеристики пропускания светофильтров из цветного стекла, http://www.elektrosteklo.ru/Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf

15. UV/VIS Bandpass&Laser Line Filters: 340-694.3 nm Center Wavelength, https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1001

16. *Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А.* Спектральная и угловая зависимости эффективности дифракционных линз с двухрельефной и двухслойной микроструктурой // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 5. С. 56–61.

17. *Грейсух Г.И., Данилов В.А., Ежов Е.Г., Степанов С.А., Усиевич Б.А.* Спектральная и угловая зависимости эффективности рельефно-фазовых дифракционных линз с двух- и трехслойной микроструктурами // Опт. спектр. 2015. Т. 118. № 6. С. 118–125.