

ОДНОСЛОЙНЫЕ КИНОФОРМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ФОТО- И ВИДЕОКАМЕР МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Г.И. Грейсух¹, Е.Г. Ежов¹, С.В. Казин¹, С.А. Степанов¹

¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (ПГУАС), Пенза, Россия

Аннотация

Скорректированы условия, гарантирующие отсутствие визуально наблюдаемого гало в изображении, формируемом камерой мобильного электронного устройства, объектив которого включает дифракционную линзу с однослойной пилообразной рельефно-фазовой микроструктурой. На примере пластмассово-линзового объектива, предназначенного для смартфона, продемонстрированы целесообразность и эффективность включения в его схему дифракционной линзы с однослойной микроструктурой, не приводящей к возникновению визуально наблюдаемого гало.

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

Цитирование: Грейсух, Г.И. Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 218-226. – DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226.

Введение

Несомненные успехи в области технологии массового производства пластмассовых рефракционных линз (РЛ), одна из сферических или асферических поверхностей которых несет однослойную пилообразную рельефно-фазовую дифракционную микроструктуру (РФДМ), обуславливают необходимость дополнительного исследования возможностей использования таких элементов в фото- и видеокамерах мобильных устройств. Практически единственной серьёзной проблемой, сдерживающей широкое использование элементов с РФДМ, является значительная вероятность возникновения цветного ореола (гало), сопровождающего наиболее яркие фрагменты изображения, формируемого оптической системой в полихроматическом излучении.

Ответственность за гало несет излучение, дифрагированное на РФДМ в побочные дифракционные порядки [1, 2]. В работе [2], опираясь на результаты экспериментальных исследований пластмассовой гибридной асферической линзы Plastic Hybrid Aspheric Lens No 65-999, серийно выпускаемой фирмой Edmund Optics [3], было показано, что отсутствие визуально наблюдаемого гало в изображении, регистрируемом матричным фотоприемником, будет гарантировано, если в пределах всего полуинтервала углов падения излучения на микроструктуру ($\theta \leq \theta_{\max}$) кривая зависимости дифракционной эффективности (ДЭ) от длины волны $\eta(\lambda)$ является выпуклой, а ее характерные точки в пределах всего используемого спектрального диапазона ($\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$) удовлетворяют условию: $\eta \approx 1$ в одной из точек внутри спектрального диапазона, $\eta \geq 0,85$ на одном из его краев и $\eta \geq 0,9$ на другом. Причем это справедливо во всем интервале освещенностей, которые рекомендуются для фотосъемки любительскими цифровыми камерами.

Вероятность возникновения гало при одном и том же распределении интенсивности по побочным дифракционным порядкам определяется, прежде всего, числовой апертурой оптической системы и соотноше-

нием оптических сил дифракционной линзы (ДЛ) и системы в целом, зависящим, в свою очередь, от выбора оптических материалов и рабочего спектрального диапазона. В этом смысле (и в рамках решаемой в настоящей статье задачи) гибридную асферическую линзу Plastic Hybrid Aspheric Lens No 65-999, использованную в работах [1, 2] для экспериментальных и теоретических исследований, можно считать типовой, а полученные результаты – достаточно универсальными.

Настоящая статья посвящена корректировке требований к ДЭ РФДМ, входящей в состав объектива мобильного электронного устройства, сопряженного с RGB (сокр. от англ. Red, Green, Blue) светочувствительной матрицей. Анализируется также достижимость скорректированных требований в видимом спектральном диапазоне и в представляющем практический интерес интервале углов падения излучения на РФДМ. В качестве примера эффективного использования РФДМ приводится оптическая схема, конструктивные параметры и основные характеристики рефракционно-дифракционного объектива для камеры смартфона.

1. Корректировка и достижимость требований к ДЭ РФДМ

Основной целью включения в схему изображающей оптической системы, рассчитанной на полихроматическое излучение, элемента с РФДМ является коррекция аберраций и, прежде всего, хроматизма [4–8]. В частности, дифракционный элемент, представляющий собой ДЛ с небольшой оптической силой, позволяет достичь высокой степени коррекции хроматизма, необходимой для получения высококачественного цветного изображения, даже используя ограниченный набор оптических материалов, например, коммерчески доступные оптические пластмассы [9–11].

Ввиду малой оптической силы микроструктура ДЛ содержит, как правило, не более 20±30 кольцевых зон Френеля (здесь отметим, что применительно к РФДМ под термином «зона Френеля» понимается участок структуры, в пределах которой фазовая задержка, вно-

симая структурой в падающий на неё волновой фронт, изменяется от 0 до 2π [12, 13]). В этом случае минимальная ширина самой узкой зоны, отнесенная к глубине пилообразного микрорельефа, $\lambda_{\min}/h > 10$.

В результате, как показано в [14, 15], 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. Поэтому ниже для анализа зависимости ДЭ от длины волны λ и угла падения излучения на РФДМ из воздуха θ будем использовать выражение, полученное в скалярном приближении и приведенное, например, в [16]:

$$\eta_m = \left\{ \sin \left[\pi \left(\Delta l / \lambda - m \right) \right] / \pi \left(\Delta l / \lambda - m \right) \right\}^2, \quad (1)$$

$$\text{где } \Delta l = h \left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta \right) - \quad (2)$$

приращение оптического пути на одном периоде пилообразной РФДМ, m – номер дифракционного порядка, n – показатель преломления на длине волны λ материала, в котором выполнена РФДМ.

Из выражений (1) и (2) нетрудно видеть, что при выбранном оптическом материале и оптимальной глубине рельефа максимальное и минимальное значения ДЭ определяются шириной спектрального диапазона $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ и полуинтервалом углов падения излучения на РФДМ $0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$. Здесь заметим, что под оптимальной глубиной рельефа h_{opt} понимается

глубина, обеспечивающая, в частности, $\eta = 1$ в первом рабочем порядке дифракции ($m = 1$) на одной из длин волн заданного спектрального диапазона.

Полевые углы 2ω , на которые рассчитываются компактные и высокоразрешающие объективы фото- и видеокамер мобильных электронных устройств, обычно не превышают 80° . При этом максимальные углы падения излучения на РФДМ удается, как правило, ограничить 25° . Поэтому ниже при анализе характеристик ДЭ однослойных РФДМ, выполненных из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс, за максимальное значение угла падения излучения на микроструктуру принято $\theta_{\max} = 25^\circ$. Кроме того, фиксировалась длинноволновая граница заданного спектрального диапазона. За нее принималась длина волны красной С-линии водорода $\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,6563$ мкм.

При выше оговоренных условиях, используя выражения (1) и (2), для типичных кроно- и флинтоподобных технологичных и коммерчески доступных сегодня оптических пластмасс определялись оптимальная глубина рельефа h_{opt} и коротковолновая граница спектрального диапазона λ_{\min} , обеспечивающие ДЭ $\eta \geq 0,85$ при всех значениях длины волны и угла падения излучения: $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ и $0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$. Полученные зависимости η от λ для всех значений θ представляют собой гладкие выпуклые кривые, достигающие максимума $\eta = 1$ на длине волны λ_m . Принципиально значимые параметры этих кривых сведены в табл. 1.

Табл. 1. Достижимые характеристики ДЭ однослойной микроструктуры, выполненной из технологичных и коммерчески доступных оптических пластмасс

Марка пластмассы	λ_{\min} , мкм	θ , °	λ_m , мкм	h_{opt} , мкм	η на длине волны	
					λ_{\min}	λ_{\max}
PMMA	0,4575	0	0,5184	1,047	0,933	0,851
		19	0,5368		0,890	0,886
		25	0,5507		0,851	0,910
E48R	0,4570	0	0,5187	0,969	0,931	0,851
		19	0,5365		0,889	0,885
		25	0,5499		0,851	0,909
PC	0,4640	0	0,5237	0,883	0,929	0,851
		19	0,5400		0,887	0,884
		25	0,5524		0,851	0,907

Табл. 1 показывает, что от оптического материала с дисперсионными характеристиками, подобными легкому кроно [polymethylmethacrylate (PMMA)], кроно [Zeonex cyclo-olefin polymer (E48R)] или флинту [polycarbonate (PC)], прежде всего, зависят ширина спектрального диапазона и оптимальная глубина рельефа. При этом все материалы на краях выбранного полуинтервала углов падения излучения ($0 \leq \theta \leq 25^\circ$) обеспечивают оговоренные во введении условия гарантированного отсутствия визуально наблюдаемого гало в изображении, регистрируемом матричным фотоприемником. В то же время внутри полуинтервала имеются углы, при которых $0,85 < \eta < 0,9$ одновременно на обоих краях выбранного спектрального диапазона. Причём $[\eta(\lambda_{\min}) + \eta(\lambda_{\max})] / 2 \geq 0,88$.

Чтобы оценить степень гарантированности отсутствия визуально наблюдаемого гало на этих углах, прежде всего, обратимся к табл. 2. Учитывая, что ощутимый вклад в гало могут вносить лишь наиболее мощные побочные порядки дифракции, в табл. 2 приведены значения ДЭ в этих порядках на краях рабочего спектрального диапазона и в пределах выбранного полуинтервала углов падения излучения на РФДМ. Данные приведены для РФДМ, выполненной из оптической пластмассы марки E48R, что позволяет сопоставить их с представленным здесь же распределением ДЭ по дифракционным порядкам РФДМ, которая экспериментально исследовалась в работах [1, 2].

Из табл. 2 следует, что при $h = 0,969$ мкм и всех углах падения излучения на РФДМ в пределах полу-

интервала $0 \leq \theta \leq 25^\circ$ ДЭ в побочных порядках дифракции не превосходят значения, соответствующие экспериментально исследованной РФДМ с глубиной рельефа $h = 1,106$ мкм.

Табл. 2. Распределение дифракционной эффективности РФДМ по порядкам дифракции

Длины волн, ограничивающие рабочий спектральный диапазон λ_{\min} и λ_{\max} (мкм) при глубине рельефа h (мкм) и угле падения излучения на РФДМ θ (град)		η в дифракционном порядке m					
		-1	0	1	2	3	
$H = 1,106^*$; $\theta \leq 4$	$\lambda_{\min} = 0,4875$	0,008	0,028	0,850	0,068	0,013	
	$\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,6563$	0,003	0,015	0,961	0,009	0,002	
$H = h_{\text{opt}} = 0,969$	$\theta = 0$	$\lambda_{\min} = 0,4570$	0,004	0,015	0,931	0,027	0,006
		$\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,6563$	0,013	0,068	0,851	0,028	0,008
	$\theta = 19,5$	$\lambda_{\min} = 0,4570$	0,007	0,023	0,886	0,049	0,010
		$\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,6563$	0,010	0,049	0,887	0,023	0,007
	$\theta = 25$	$\lambda_{\min} = 0,4570$	0,008	0,028	0,851	0,068	0,013
		$\lambda_{\max} = \lambda_C = 0,6563$	0,008	0,038	0,909	0,019	0,006

*РФДМ именно с такой глубиной пилообразной микроструктуры и при таком угле падения излучения экспериментально исследовалась в работе [1].

Далее обратимся к типичным кривым спектральной чувствительности трехканального матричного RGB-фотоприёмника (рис. 1) и предположим, что благодаря полосовому светофильтру на фотоприёмник попадает излучение только с длинами волн, удовлетворяющими условию $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$.

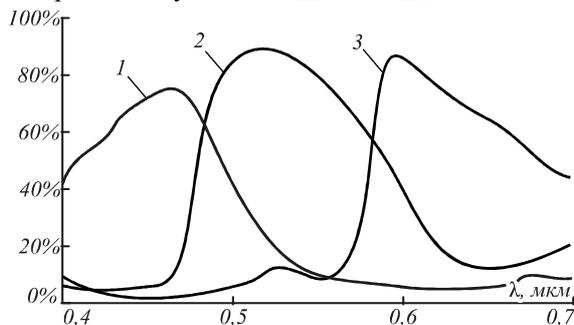


Рис. 1. Типичные кривые спектральной чувствительности элементов CMOS-фотоприёмника, реагирующих на синий (1), зелёный (2) и красный (3) свет [17]

Учитывая приблизительную симметрию кривой суммарной чувствительности CMOS-фотоприёмника к видимому излучению относительно вертикали, соответствующей длине волны $\lambda \approx 0,525$ мкм (в частности, чувствительность матрицы на длинах волн 0,4570 мкм и 0,6563 мкм отличается незначительно), а также то, что коротковолновая и длинноволновая части спектра регистрируются фактически двумя независимыми каналами фотоприёмника, можно с уверенностью полагать, что реакция матрицы на пропускаемое излучение с коротковолновой и длинноволновой сторон рабочего спектра будет подобной. И если при этом благодаря ДЭ, заключенной в интервале $0,85 \leq \eta \leq 1$, визуально наблюдаемое гало гарантированно отсутствует в пределах спектрального диапазона $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_m$, то оно столь же гарантированно будет отсутствовать и в спектральном диапазоне $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$.

Поэтому в скорректированном виде условия гарантированного отсутствия визуально наблюдаемого гало в изображении, формируемом оптической системой с однослойной пилообразной РФДМ и сопряженной с RGB светочувствительной матрицей, должны иметь следующий вид. Кривые зависимости ДЭ РФДМ от длины вол-

ны во всем полуинтервале углов падения излучения на микроструктуру ($0 \leq \theta \leq \theta_{\max}$) должны быть гладкими и выпуклыми, а их характерные параметры в пределах всего используемого спектрального диапазона ($\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$) удовлетворять условию: $\eta \approx 1$ на одной из длин волн внутри спектрального диапазона и $\eta \geq 0,85$ на его краях.

2. Расчет рефракционно-дифракционного объектива для камеры смартфона

В качестве примера объектива, у которого может быть достигнуто высокое качество формируемого изображения и одновременно соблюдены условия, обеспечивающие отсутствие визуально наблюдаемого гало, является компактный пластмассово-линзовый рефракционно-дифракционный объектив, предназначенный для фото- и видеокамеры смартфона. Включение в этот объектив РФДМ, нанесенной на поверхность одной из пластмассовых РЛ, призвано обеспечить достижение требуемой коррекции хроматизма при минимальном количестве марок используемых для этих линз оптических пластмасс.

Анализ конструкций объективов и основных параметров камер смартфонов, выпускаемых ведущими производителями (Apple, Samsung, Nokia, Sony, LG и НТС), позволяет сформулировать требования, предъявляемые к ним. Основные из этих требований сведены в табл. 3 [18].

В работах [18, 19] представлены несколько вариантов объективов, удовлетворяющих требованиям, приведенным в табл. 3. РЛ этих объективов выполнены из материалов двух типов: кроноподобного пластика (например, F52R) и флинтоподобного пластика (например, ОКР4). В настоящей статье мы представляем один из рассчитанных рефракционно-дифракционных объективов, также удовлетворяющий требованиям вышеприведенной таблицы, но все РЛ которого изготовлены только из одного наиболее технологичного и коммерчески доступного кроноподобного пластика – E48R. Компонировка схемы этого объектива и расчет осуществлялись с использованием методики, изложенной в работах [20, 6] и дополненной работой [21].

Табл. 3. Основные требования, предъявляемые к оптике смартфона

№ п/п	Параметр	Требование к параметру
1	Формат матричного фотоприёмника	1/3" (диагональ 2y' = 6 мм)
2	Размер пикселя	≤ 2 мкм
3	Размер углового поля в пространстве предметов, 2ω	60...80°
4	Диафрагменное число	2,0 ÷ 2,2
5	Суммарная длина объектива (расстояние от вершины фронтальной поверхности первой линзы до плоскости изображения, формируемого объективом), L	≤ 5,5 мм
6	Дифракционная полихроматическая ЧКХ по уровню 0,2	≥ 200 мм ⁻¹
7	Дисторсия	≤ 1%
	Задний фокальный отрезок, s'F	≥ 0,5 мм
	Углы падения главных лучей на периферийные элементы фотоприёмника	≤ 30°
8	Число линз	≤ 5
9	Осевая толщина линз	≥ 0,3 мм
10	Краевая толщина линз	≥ 0,1 мм

На рис. 2 представлена принципиальная схема рассчитанного объектива.

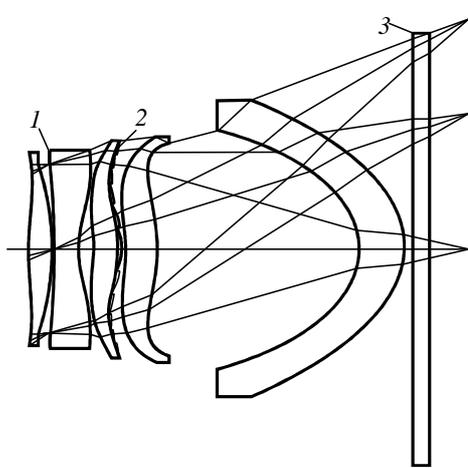


Рис. 2. Принципиальная схема рефракционно-дифракционного объектива смартфона, все линзы которого выполнены из одного и того же пластика E48R: 1 – апертурная диафрагма; 2 – поверхность РЛ, на которой сформирована РФДМ; 3 – полосовой фильтр, отсекающий коротковолновое и ИК-излучение

В табл. 4 и 5 – его конструктивные параметры, полученные путем оптимизации с помощью программы оптического проектирования ZEMAX [22].

При этом каждая из поверхностей пластмассовых РЛ объектива представляла собой так называемую «чётную асферическую поверхность», описываемую в ZEMAX уравнением:

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)c^2\rho^2}} + \sum_{p=2} \alpha_p \rho^{2p}, \quad (3)$$

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

Что же касается РФДМ, то она в рамках ZEMAX моделировалась поверхностью типа “Binary2” с фазовой задержкой вида

$$\Psi(\rho) = m \sum_{j=1} A_j \rho^{2j}, \quad (4)$$

где m – номер рабочего дифракционного порядка, A_j – постоянные коэффициенты.

Табл. 4. Основные конструктивные параметры рефракционно-дифракционного объектива смартфона

№ поверхности	Радиус, мм	Коническая константа	Толщина, мм	Материал
0'	∞	0	∞	
1	4,1723	-62,77255	0,300	E48R
2	-3,3065	5,667477	-0,026	
3''	∞	0	0,059	
4	5,5713	7,021478	0,3	E48R
5	1,3045	-0,4972161	0,183	
6	-3,6370	-1,721503	0,3	E48R
7'''	-1,1799	-10,08505	0,098	
8	-2,1661	-53,40528	0,405	E48R
9	-2,7536	-33,24633	2,511	
10	-0,9247	-0,6257682	0,571	E48R
11	-1,0895	-1,692445	0,100	
12	∞	0	0,2	
13	∞	0	0,5	Модель''''
14''''	∞	0	0	

$L = 5,5$ мм; $f' = 4,63$ мм; $2\omega = 64^\circ$; $2y' \cong 6$ мм

' – плоскость предмета;

'' – апертурная диафрагма;

''' – поверхность типа “Binary2”: $m = 1$; $A_1 = -98,353991 \text{ мм}^2$; $A_2 = 51,954342 \text{ мм}^4$; $A_3 = -63,700863 \text{ мм}^6$; $A_4 = 14,167592 \text{ мм}^8$; $A_5 = 33,974675 \text{ мм}^{10}$;
 $A_6 = -31,194861 \text{ мм}^{12}$; $A_7 = 10,499028 \text{ мм}^{14}$; $A_8 = -0,68912357 \text{ мм}^{16}$; $A_9 = -0,8086597 \text{ мм}^{18}$; $A_{10} = 0,24764069 \text{ мм}^{20}$;
 "" – модель материала полосового фильтра с показателем преломления на длине волны $\lambda_d = 0,5876 \text{ мкм}$ и коэффициентом дисперсии $n_d = 1,52$ и $v_d = 64,2$ соответственно;
 "" – плоскость изображения.

Табл. 5. Коэффициенты асферичности поверхностей

№	$\alpha_2, \text{ мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{ мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{ мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{ мм}^{-9}$	$\alpha_6, \text{ мм}^{-11}$	$\alpha_7, \text{ мм}^{-13}$	$\alpha_8, \text{ мм}^{-15}$
1	0,040028156	-0,10029742	0,013696197	0,0045039273	0,011355034	0,00053759255	-0,0017495739
2	0,041248321	0,0093021256	-0,076678053	0,11113078	-0,068909447	0,027643042	-0,0034875468
4	-0,27826001	0,13911714	0,025389691	-0,053143081	0,01631266	-0,0050401896	0,0012605412
5	-0,32575122	0,10721247	0,0081975416	-0,05597227	0,010029749	0,014874619	-0,0055638867
6	0,198485	0,06472788	-0,083388816	0,010102354	0,0063396721	-0,0014381499	0,00013620236
7	0,049841564	0,23560507	-0,1231064	-0,008722218	-0,0061283395	0,013058487	-0,0026969336
8	0,20565862	-0,1307281	0,070033914	-0,007885877	-0,0018348763	-0,0000792787	0,00030967869
9	-0,10847767	0,14172967	-0,077279723	0,042235992	-0,0017294709	0,0012441066	-0,0011404037
10	-0,21577015	0,12847921	0,11910317	-0,13904059	0,046785364	-0,0009114178	-0,0015633367
11	-0,22418015	0,092038817	0,0056128545	-0,011178895	0,000037502433	0,0011329161	-0,0001974825

Диафрагменное число рассчитанного объектива 2,2, а углового поле в пространстве предметов $2\omega = 64^\circ$. При этом требования и ограничения на остальные параметры, сведенные в табл. 3, соответствуют значениям, приведенным в этой таблице. Это видно, в частности, из табл. 4, а также рис. 3, на котором представлена дифракционная полихроматическая частотно-контрастная характеристика (ЧКХ).

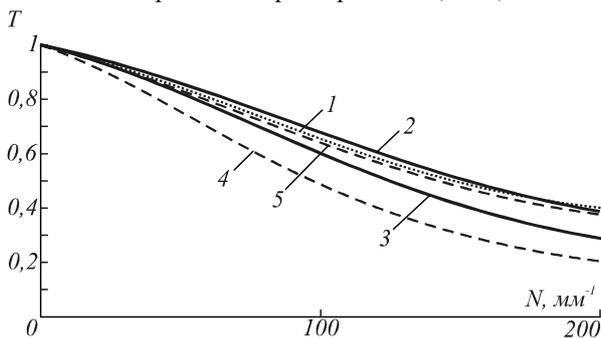


Рис. 3. Дифракционная полихроматическая ЧКХ (T – контраст; N – пространственная частота): 1 – при $\omega = 0$; 2 и 3 – при $\omega = 20^\circ$; 4 и 5 – при $\omega = 32^\circ$ для меридиональной и сагиттальной плоскостей, соответственно

Несмотря на то, что все РЛ объектива выполнены только из одного оптического материала, использование в объективе РФДМ позволило достичь требуемой коррекции хроматизма, о чем, в частности, свидетельствует кривая продольного хроматизма, представленная на рис. 4.

На рис. 5 приведена кривая распределения фазовой задержки по апертуре РФДМ, из которой, в частности, видно, что дифракционная микроструктура состоит из двадцати пяти зон Френеля. При этом размер минимальной зоны Френеля составляет величину порядка 24 мкм.

Благодаря расположению РФДМ на задней поверхности третьей РЛ удалось обеспечить сравнительно низкие ($\theta < 25^\circ$) углы падения лучей из воздуха на микроструктуру, что является одним из условий достижения высокой ДЭ и отсутствия визуально наблюдаемого гало. Вторым условием отсутствия гало является огра-

ничение спектрального диапазона излучения, падающего на фотоприёмник. Это осуществляется с помощью полосового фильтра, обрезающего излучение с длинами волн $\lambda < 0,457 \text{ мкм}$, а также ИК-излучение. В результате все условия, обеспечивающие высокое качество изображения и отсутствие визуально наблюдаемого гало, оказались выполненными.

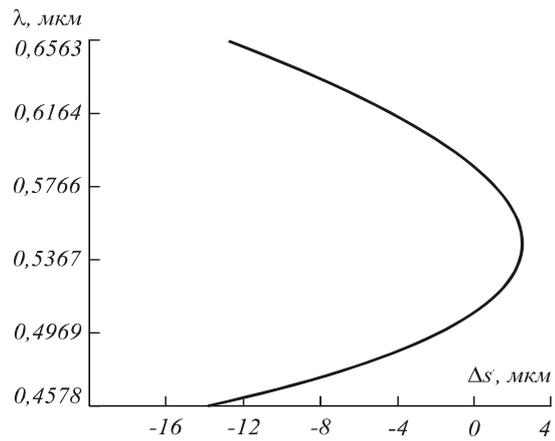


Рис. 4. Продольный хроматизм

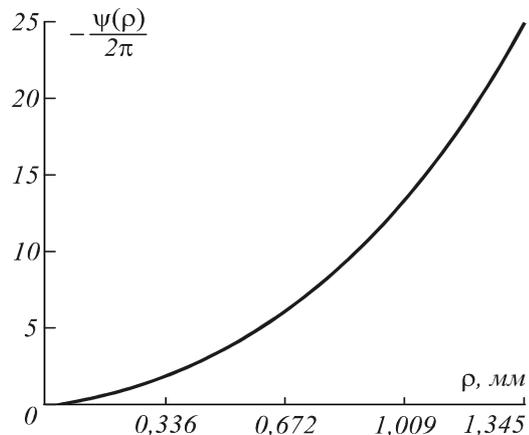


Рис. 5. Распределение фазовой задержки по апертуре РФДМ

Сразу же отметим, что использование полосового фильтра окажет на формируемое на матричном фото-

приёмнике изображение примерно то же влияние, что и обычно применяемый при фотосъемке жёлтый светофильтр ЖС-12 [23]. Возникающий в этом случае желтоватый оттенок изображения при желании может быть устранен цифровой коррекцией с помощью инструмента «Баланс белого» в любом растровом редакторе, например, Adobe Photoshop [24]. Кроме того, в программном обеспечении камеры мобильного устройства возможно предусмотреть автоматический сдвиг баланса белого на заранее заданную величину.

Заключение

Визуально наблюдаемое гало в изображении, формируемом оптической системой, сопряженной с RGB светочувствительной матрицей и включающей однослойную пилообразную РФДМ, будет гарантированно отсутствовать, если кривые зависимости ДЭ РФДМ от длины волны, будучи гладкими и выпуклыми при всех углах падения излучения на микроструктуру ($-\theta_{\max} \leq \theta \leq \theta_{\max}$) и в пределах всего используемого спектрального диапазона ($\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$), удовлетворяют условию: $\eta \approx 1$ на одной из длин волн внутри спектрального диапазона и $\eta \geq 0,85$ на его краях. При этом отказ от более жесткого требования, допускающего падение ДЭ до уровня $\eta \geq 0,85$ только в одной из точек внутри рабочих углового и спектрального диапазонов, позволяет значительно расширить эти диапазоны. Так, в частности, при выполнении РФДМ из технологичных и коммерчески доступных сегодня оптических пластмасс скорректированное условие ограничения ДЭ гарантированно обеспечивает отсутствие гало в изображении при $\lambda_{\max} = \lambda_c = 0,6563$ мкм, $\lambda_{\min} \geq 0,4570$ мкм, соответствующей светофильтру ЖС12 (вместо $\lambda_{\min} \geq 0,470$ мкм, соответствующей светофильтру ЖС16) и $\theta_{\max} \leq 25^\circ$ (вместо $\theta_{\max} \leq 18,5^\circ$).

Очевидно, что чем шире допустимый спектральный диапазон, тем легче и эффективнее можно осуществить цифровую коррекцию цвета, а если учесть, что параллельно расширяется и интервал допустимых углов падения излучения на РФДМ (что позволяет рассчитывать объективы с РФДМ на полевые углы 2ω до 80°), то скорректированное условие ограничения ДЭ представляется несомненно эффективным.

Высокое качество формируемого изображения с одновременным соблюдением условий, обеспечивающих отсутствие визуально наблюдаемого гало, может быть достигнуто у компактного пластмассово-линзового рефракционно-дифракционного объектива, предназначенного для фото- и видеокамеры смартфона. Включение в такой объектив РФДМ, нанесенной на поверхность одной из пластмассовых РЛ, позволяет, выполнив основные требования, предъявляемые к оптике смартфона, обеспечить достижение требуемой коррекции хроматизма даже при условии, что все РЛ объектива изготовлены только из одного материала, например из технологичной и коммерчески доступной кроноподобной оптической пластмассы – E48R.

Что же касается возможной цифровой коррекции цвета, то такова плата за простейшую технологию штамповки РФДМ.

Литература

1. Грейсук, Г.И. Визуальная оценка влияния побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой / Г.И. Грейсук, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 418-424.
2. Грейсук, Г.И. Влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной цифровой фотокамерой / Г.И. Грейсук, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, Вып. 3. – С. 27-31.
3. Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses [Электронный ресурс]. – URL: http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/#f=categories_sj*C311I* (дата обращения 12.10.2016).
4. Flores, A. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus / A. Flores, M.R. Wang, J.J. Yang // Applied Optics. – 2004. – Vol. 43(30). – P. 5618-5630. – DOI: 10.1364/AO.43.005618.
5. Rostalski, H.-J. Use of diffractive lenses in lithographic projection lenses // International Optical Design Conference 2006: Technical Digest. – 2006. – WD4. – DOI: 10.1364/IODC.2006.WD4.
6. Dutta, U. Monochromatic primary aberrations of a diffractive lens on a finite substrate / U. Dutta, L. Hazra // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49(18). – P. 3613-3621. – DOI: 10.1364/AO.49.003613.
7. Грейсук, Г.И. Моделирование и исследование суперхроматизации рефракционных и рефракционно-дифракционных оптических систем / Г.И. Грейсук, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, А.В. Калашников, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 395-404.
8. Peng, Y. Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics / Y. Peng, Q. Fu, H. Amata, Sh. Su, F. Heide, W. Heidrich // Optics Express. – 2015. – Vol. 23(24). – P. 31393-31407. – DOI: 10.1364/OE.23.031393.
9. 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. – Vol. 49(23). – P. 4379-4384. – DOI: 10.1364/AO.49.004379.
10. 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. – Vol. 51(20). – P. 4597-4604. – DOI: 10.1364/AO.51.004597.
11. 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. – Vol. 52(23). – P. 5843-5850. – DOI: 10.1364/AO.52.005843.
12. Коронкевич, В.П. Современные зонные пластинки / В.П. Коронкевич, И.Г. Пальчикова // Автометрия. – 1992. – № 1. – С. 85-100.
13. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с. – ISBN: 5-9221-0845-4.
14. Грейсук, Г.И. Подавление спектральной селективности двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур / Г.И. Грейсук, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Е.Г. Ежов,

- С.А. Степанов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106(4). – С. 694-699. – ISSN 0030-4034.
15. **Greisukh, G.I.** Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth / G.I. Greisukh, V.A. Danilov, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov, B.A. Usievich // Optics Communication. – 2015. – Vol. 338. – P. 54-57. – DOI: 10.1016/j.optcom.2014.10.037.
 16. **Buralli, D.A.** Optical performance of holographic kinoforms / D.A. Buralli, G.M. Morris, J.R. Rogers // Applied Optics. – 1989. – Vol. 28(5). – P. 976-983. – DOI: 10.1364/AO.28.000976.
 17. **Вершовский, А.** Кому нужна эта фотоплёнка? [Электронный ресурс]. – URL: <http://photo-element.ru/analysis/film/film.html> (дата обращения 12.12.2016).
 18. **Reshidko, D.** Optical analysis of miniature lenses with curved imaging surfaces / D. Reshidko, J. Sasian // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54(28). – P. E216-E223. – DOI: 10.1364/AO.54.00E216.
 19. **U.S. Patent 20140300975 A1 G 02 B 13/00, 359/714.** Image capturing lens assembly / T.-H. Tsai, H.-H. Huang, filed of April 12, 2013, published of October 9, 2014.
 20. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45(24). – P. 6137-6141. – DOI: 10.1364/AO.45.006137.
 21. **Грейсух, Г.И.** Учёт дифракционной эффективности в методике проектирования рефракционно-дифракционных оптических систем / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, Вып. 3. – С. 32-38.
 22. ZEMAX: software for optical system design [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.radiantzemax.com> (дата обращения 12.10.2016).
 23. Спектральные характеристики пропускания светофильтров из цветного стекла [Электронный ресурс]. – URL: http://www.elektrosteklo.ru/Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf (дата обращения 12.10.2016).
 24. **Маргулис, Д.** Photoshop LAB Color. Загадка каньона и другие приключения в самом мощном цветовом пространстве / Д. Маргулис; пер. с англ. – М.: Интелбук, 2006. – 480 с. – ISBN: 5911570025.

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 расчета оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха более 150 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств. E-mail: grev@pguas.ru.

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 расчета оптических систем, математического моделирования и защиты информации. В списке научных работ Е.Г. Ежова свыше 60 статей и учебник. E-mail: grev@pguas.ru.

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 15 публикаций. E-mail: grev@pguas.ru.

Степанов Сергей Алексеевич, 1951 года рождения. В 1974 году окончил Куйбышевский государственный университет (ныне Самарский 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 расчета оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова более 120 статей, 2 монографии, 5 авторских свидетельств. E-mail: asut@pguas.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 11 ноября 2016 г. Окончательный вариант – 27 февраля 2017 г.

SINGLE-LAYER KINOFORMS FOR CAMERAS AND VIDEO CAMERAS OF MOBILE COMMUNICATION DEVICES

G.I. Greisukh¹, E.G. Ezhov¹, S.V. Kazin¹, S.A. Stepanov¹

¹Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

Abstract

Conditions that guarantee the absence of a visually observed halo in the image formed by the camera of a mobile communication device containing a diffractive lens with a single-layer saw-

tooth phase microrelief are corrected. The feasibility and effectiveness of using the diffractive lens with a single-layer microstructure, which does not lead to the emergence of a visually observable halo, are demonstrated by the example of a plastic objective lens for the smartphone.

Keywords: diffraction efficiency, relief-phase diffraction microstructure, halo, diffractive lens.

Citation: Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Single-layer kinoforms for cameras and video cameras of mobile communication devices. *Computer Optics* 2017; 41(2): 218-226. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2- 218-226.

References

- [1] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Sidiyakina ZA, Stepanov SA. Visual assessment of the influence of adverse diffraction orders on the quality of image formed by the refractive-diffractive optical system. *Computer Optics* 2014; 38(3): 418-424.
- [2] Greisukh GI, Ezhov EG, Kazin SV, Stepanov SA. Effect of side diffraction orders on imaging quality produced by a refractive/diffractive objective in a digital camera. *Journal of Optical Technology* 2016; 83(3): 159-162. DOI: 10.1364/JOT.83.000159.
- [3] Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses. Source: (http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/#f=categories_s1*C3111I*).
- [4] Flores A, Wang MR, Yang JJ. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus. *Appl Opt* 2004; 43(30): 5618-5630. DOI: 10.1364/AO.43.005618.
- [5] Rostalski H-J. Use of diffractive lenses in lithographic projection lenses. *IODC 2006 Technical Digest* 2006: WD4. DOI: 10.1364/IODC.2006.WD4.
- [6] Dutta U, Hazra L. Monochromatic primary aberrations of a diffractive lens on a finite substrate. *Appl Opt* 2010; 49(18): 3613-3621. DOI: 10.1364/AO.49.003613.
- [7] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Kalashnikov AV, Stepanov SA. Modeling and investigation superachromatization refractive and refractive-diffractive optical systems. [In Russian]. *Computer Optics* 2012; 36(3): 395-404.
- [8] Peng Y, Fu Q, Amata H, Su Sh, Heide F, Heidrich W. Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics. *Optics Express* 2015; 23(24): 31393-31407. DOI: 10.1364/OE.23.031393.
- [9] Greisukh GI, Ezhov EG, Levin IA, Stepanov SA. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives. *Appl Opt* 2010; 49(23): 4379-4384. DOI: 10.1364/AO.49.004379.
- [10] Greisukh GI, Ezhov EG, Kalashnikov AV, Stepanov SA. Diffractive-refractive correction units for plastic compact zoom lenses. *Appl Opt* 2012; 51(20): 4597-4604. DOI: 10.1364/AO.51.004597.
- [11] Greisukh GI, Ezhov EG, Sidiyakina ZA, Stepanov SA. Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum. *Appl Opt* 2013; 52(23): 5843-5850. DOI: 10.1364/AO.52.005843.
- [12] Koronkevich VP, Palchikova IG. Modern zone plates [In Russian]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 1992; 1: 86-100.
- [13] Soifer VA, ed. *Diffractive Computer Optics* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2007. ISBN: 5-9221-0845-4.
- [14] Greisukh GI, Bezus EA, Bykov DA, Ezhov EG, Stepanov SA. Suppression of the spectral selectivity of two-layer relief-phase diffraction structures. *Optics and Spectroscopy* 2009; 106(4): 621-626. DOI: 10.1134/S0030400X09040249.
- [15] Greisukh GI, Danilov VA, Ezhov EG, Stepanov SA, Usievich BA. Comparison of electromagnetic and scalar methods for evaluation of efficiency of diffractive lenses for wide spectral bandwidth. *Optics Communication* 2015; 338: 54-57. DOI: 10.1016/j.optcom.2014.10.037.
- [16] Buralli DA, Morris GM, Rogers JR. Optical performance of holographic kinoforms. *Appl Opt* 1989; 28(5): 976-983. DOI: 10.1364/AO.28.000976.
- [17] Vershovskiy A. Who needs this film? Source: (<http://photoelement.ru/analysis/film/film.html>-December-2016).
- [18] Reshidko D, Sasian J. Optical analysis of miniature lenses with curved imaging surfaces. *Appl Opt* 2015; 54(28): E216-E223. DOI: 10.1364/AO.54.00E216.
- [19] Tsai T-H, Huang H-H. Image capturing lens assembly. Patent US 20140300975 A1. filed of April 12, 2013, published of October 9, 2014.
- [20] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Diffractive-refractive hybrid corrector for achro- and apochromatic corrections of optical systems. *Appl Opt* 2006; 45(24): 6137-6141. DOI: 10.1364/AO.45.006137.
- [21] Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Taking diffractive efficiency into account in the design of refractive/diffractive optical systems. *J Opt Technol* 2016; 83(3): 163-167. DOI: 10.1364/JOT.83.000163.
- [22] ZEMAX: software for optical system design. Source: (<http://www.radiantzemax.com>-October-2016).
- [23] Color glass spectral transmittance. Source: (http://www.elektrosteklo.ru/Color_Glass_Spectral_Transmittance.pdf).
- [24] Margulis D. *Photoshop LAB Color: The Conyon conundrum and other adventures in the most powerful color-space*. Berkeley, CA: Peachpit Press; 2005. ISBN: 978-0-321-35678-9.

Authors' information

Grigoriy Isaevich Greisukh (b. 1943) graduated (1965) from Penza Politechnical 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 150 scientific papers, 3 monographs, and 9 inventions.

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 60 scientific papers and tutorial.

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 15 publications.

Sergei Alekseevich Stepanov (b. 1951) graduated (1974) from Kuibyshev State University (presently, Samara National Research University), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (1999) degrees from Samara National Research University, professor (2001). He is professor in 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 120 scientific papers, 2 monographs, and 5 inventions.

Received November 11, 2016. The final version – February 27, 2017.
