

## ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

### ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ «АХРОМАТИЗАЦИИ» РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР

Г. И. Грейсх, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

#### Аннотация

В работе описана методика выбора материалов двухслойной рельефно-фазовой микро-структуры дифракционных оптических элементов с целью их так называемой «ахроматизации», т.е. снижения зависимости дифракционной эффективности от длины волны в заданном спектральном диапазоне.

#### Введение

Зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) дифракционных оптических элементов от длины волны в ряде случаев существенно ограничивает эффективность использования таких элементов. Преодолеть указанное ограничение позволяет предложенное в 1985 г. А.В. Лукиным, К.С. Мустафиным и Р.А. Рафиковым решение, позволяющее выровнять с той или иной степенью точности ДЭ в заданном спектральном диапазоне [1]. Это решение, предполагает построение многослойных и, в частности, двухслойных рельефно-фазовых микро-структур. Аналогичные решения предложены и в ряде других более поздних работ, см., например, [2, 3]. На практике многослойные структуры для выравнивания ДЭ впервые использованы фирмой Canon в новых телеобъективах [4].

ДЭ работающей на просвет рельефно-фазовой микро-структуры зависит от величины фазового сдвига, вносимого в проходящую волну. В случае двухслойной микро-структуры величина фазового сдвига определяется выражением

$$\Delta\varphi(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} h \Delta n(\lambda), \quad (1)$$

где  $h$  - высота микрорельефа;  $\lambda$  - длина падающей волны;  $\Delta n$  - разность показателей преломления двух слоев микро-структуры на длине волны  $\lambda$  (рис. 1).

Из выражения (1) видно, что фазовый сдвиг, а, следовательно, и ДЭ не будут зависеть от длины волны, если разность показателей преломления двух слоев микро-структуры окажется линейной функцией длины волны вида

$$\Delta n(\lambda) = b\lambda, \quad (2)$$

где  $b$  - величина, независящая от длины волны.

Решение, направленное на подавление зависимости ДЭ от длины волны за счет построения структуры из нескольких слоев универсально в том плане, что положительный эффект не зависит от закона изменения пространственной частоты структуры по поверхности дифракционного оптического элемента. Следовательно, это решение применимо для «ахроматизации» элементов любого типа и, в частности,

таких как дифракционные решетки, дифракционные линзы и фокусаторы.

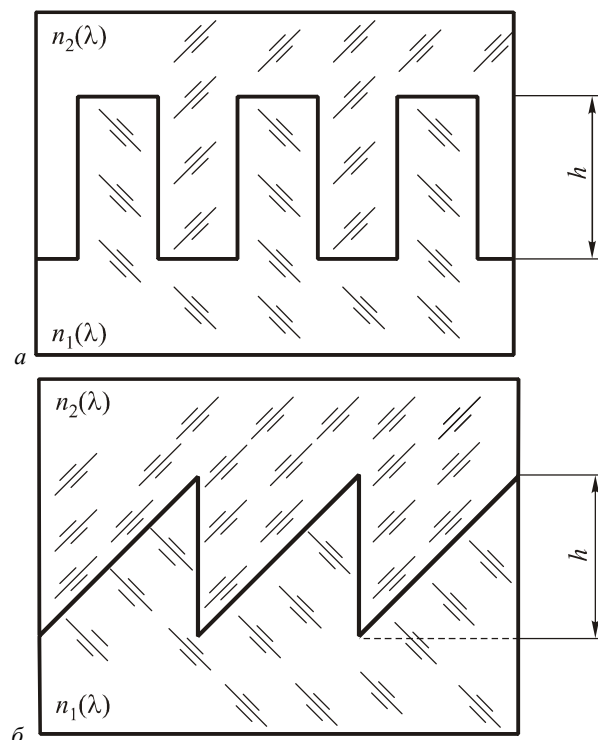


Рис. 1. «Ахроматическая» двухслойная рельефно-фазовая микро-структура с бинарным (а) и пилообразным (б) профилем штриха

В данной статье предлагается методика выбора материалов двухслойной рельефно-фазовой микро-структуры, обеспечивающая в заданном спектральном диапазоне с достаточно высокой точностью выполнение условия (2), а, следовательно, и выравнивание ДЭ в этом спектральном диапазоне.

#### Методика выбора оптических материалов

Реальный оптический материал (стекло, пластик или поликристалл) заменяется моделью, у которой показатель преломления в заданном спектральном диапазоне линейно зависит от длины волны используемого излучения

$$N(\lambda) = \bar{N} + B(\lambda - \bar{\lambda}), \quad (3)$$

где  $\bar{N}$  - показатель преломления модели на опорной длине волны  $\bar{\lambda}$  близкой к середине заданного спектрального диапазона. Отметим, что в формуле (3) и ниже показатель преломления модели и коэффициенты, входящие в него, в отличие от соответствующих величин, относящихся к реальным материалам, обозначены прописными буквами.

Замена конкретного материала моделью осуществляется путем линейризации показателя преломления в заданном спектральном диапазоне, например, методом наименьших квадратов. В этом случае величины  $\bar{N}$  и  $B$  определяются по формулам [5]

$$\bar{N} = \frac{\sum_{j=1}^J \lambda_j^2 \sum_{j=1}^J n_j + \left( J\bar{\lambda} - \sum_{j=1}^J \lambda_j \right) \sum_{j=1}^J \lambda_j n_j - \bar{\lambda} \sum_{j=1}^J \lambda_j \sum_{j=1}^J n_j}{J \sum_{j=1}^J \lambda_j^2 - \left( \sum_{j=1}^J \lambda_j \right)^2}, \quad (4)$$

$$B = \frac{J \sum_{j=1}^J \lambda_j n_j - \sum_{j=1}^J \lambda_j \sum_{j=1}^J n_j}{J \sum_{j=1}^J \lambda_j^2 - \left( \sum_{j=1}^J \lambda_j \right)^2}, \quad (5)$$

где  $J$  - количество отсчетов внутри заданного спектрального диапазона;  $n_j$  - показатель преломления реального оптического материала на длине волны  $\lambda_j$ .

Требование (2) при линейризации показателей преломления в соответствии с выражением (3) обуславливает связь коэффициентов  $\bar{N}$  и  $B$  моделей двух выбранных материалов, описываемую ниже следующим уравнением:

$$(\bar{N}_1 - \bar{N}_2) + (B_2 - B_1)\bar{\lambda} = 0. \quad (6)$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся к материалам первого и второго слоев микроструктуры, соответственно. Одновременное же выполнение условий (3) и (6) приводит к тому, что прямые зависимостей  $N_1(\lambda)$  и  $N_2(\lambda)$  должны пересекаться в точке  $\lambda = 0$ , как показано на рис. 2.

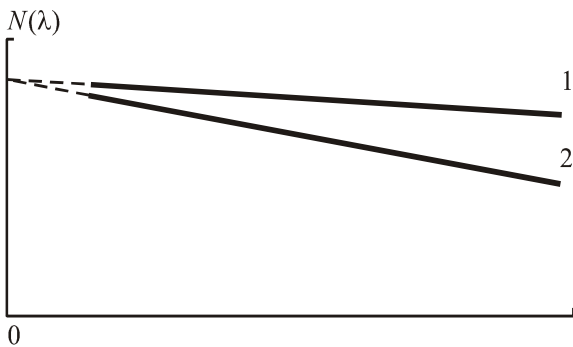


Рис. 2. Прямые зависимостей  $N_1(\lambda)$  (1) и  $N_2(\lambda)$  (2), удовлетворяющих условиям (3) и (6)

При этом, поскольку, как следует из (2), с ростом длины волны разность показателей преломления должна неуклонно возрастать, то материалы двух слоев должны иметь разную величину дисперсии и материал с меньшей дисперсией должен иметь больший показатель преломления. В случае стекол это реализуется парой, включающей крона (малая дисперсия) и флинт (большая дисперсия), причем показатель преломления крона должен превышать показатель преломления флинта.

На рис. 3 в координатах  $\bar{N}$  и  $B$  представлено семейство точек, соответствующих моделям 14 реально существующих флинтов, выбранных из отечественного и ряда иностранных каталогов стекла. Линейризация показателей преломления этих стекол выполнена в интервале длин волн, охватывающем видимый и ближний ИК диапазоны ( $\lambda_{\min} = 0,4$  мкм и  $\lambda_{\max} = 0,9$  мкм), а в качестве опорной, принята длина волны излучения He-Ne лазера ( $\bar{\lambda} = 0,6328$  мкм). Параллельные прямые I и II на рис. 3 – зависимости

$$\bar{N}_2(B_2) = \bar{N}_1 + (B_2 - B_1)\bar{\lambda}, \quad (7)$$

относящиеся ко второму слою, в случае если первый слой выполняется из моделей, полученных путем линейризации в том же самом спектральном диапазоне показателей преломления кронов двух марок: BACED4 (каталог HOYA) и E65-40 (каталог OLD\_CORN). Подчеркнем, что каждая из этих прямых является геометрическим местом точек, образующих семейство моделей флинтов, которые в паре с моделью соответствующего крона (в данном случае с BACED4 или E65-40) обеспечат строгое постоянство ДЭ.

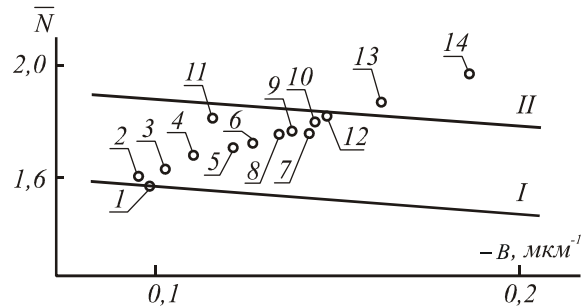


Рис. 3. Семейства точек, удовлетворяющих уравнению (7) (прямые I, II) и точек, соответствующих моделям флинтов (1-14):  
 1- FF5 (каталог HOYA); 2- F2 (каталог SCHOTT);  
 3- E-FD2 (каталог HOYA); 4- TФ8 (каталог ГОСТ);  
 5- FD1 (каталог HOYA); 6- FD10 (каталог OLD HOYA);  
 7- FF8 (каталог HOYA); 8- SFL4 (каталог SCHOTT);  
 9- FD14 (каталог HOYA); 10- FD110 (каталог HOYA);  
 11- LASF36A (каталог SCHOTT); 12- FD6 (каталог HOYA);  
 13- FDS90 (каталог HOYA);  
 14- SF58 (каталог SCHOTT)

Прямая I проходит через точку семейства, соответствующую модели флинта FF5, а к прямой II максимально близка точка, соответствующая модели флинта FD6 (оба стекла из каталога HOYA). По-

строив прямые  $\bar{N}_2(B_2)$ , соответствующие моделям всего ряда доступных для использования кронов, и идентифицировав ближайшие к каждой из прямой точки семейства моделей реально существующих флинтгов, найдем все «крон-флинтковые» пары, способные обеспечить с той или иной точностью постоянство ДЭ в заданном спектральном диапазоне. Сама же точность будет зависеть от двух факторов: во-первых, от того, насколько точка, соответствующая модели выбранного флинта, близка к прямой  $\bar{N}_2(B_2)$  и, во-вторых, от достижимой точности линеаризации в заданном спектральном диапазоне показателей преломления выбранных крона и флинта.

Формулу для вычисления ДЭ рельефно-фазовой микроструктуры со ступенчатым профилем штриха (рис. 4), выполненной из стекла двух выбранных марок, можно получить, взяв за основу полученное в скалярном приближении выражение, приведенное, например, в [6]:

$$\eta_m = \frac{\sin^2\left(\pi \frac{m}{k}\right) \sin^2\left[\pi \left(m + \frac{k\varphi}{\lambda}\right)\right]}{\pi^2 m^2 \sin^2\left[\frac{\pi}{k} \left(m + \frac{k\varphi}{\lambda}\right)\right]}, \quad (8)$$

где

$$\varphi = \frac{\lambda_0 (n_1 - n_2)}{k (n_{01} - n_{02})}, \quad (9)$$

$m$  - номер порядка дифракции;  $k$  - число ступеней в профиле штриха;  $\lambda_0$  - длина волны, под которую рассчитывается микрорельеф с целью достижения на ней максимальной ДЭ;  $n_i$  и  $n_{0i}$  ( $i=1; 2$ ) - показатели преломления  $i$ -го слоя структуры на длинах волн  $\lambda$  и  $\lambda_0$ , соответственно;  $\varphi$  - приращение оптического пути за счет одной ступени профиля на длине волны  $\lambda$ .

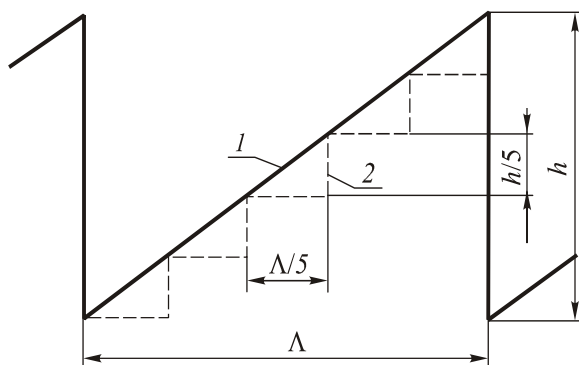


Рис. 4. Пилообразный профиль штриха микроструктуры (1) и его приближение ступенчатым профилем (2) при числе ступеней  $k=5$

Напомним, что в приведенном на рис. 1а случае бинарной микроструктуры, т.е. при  $k=2$ , ДЭ в первом порядке дифракции достигает максимума при  $\Delta\varphi = \pi$ , в то время как в случае пилообразного или

многоступенчатого профиля штриха ( $k \geq 3$ ) - при  $\Delta\varphi = 2\pi$ . Поэтому, как это следует из выражения (1), высота микрорельефа, обеспечивающая на длине волны  $\lambda_0$ , максимальную ДЭ, равна

$$h = \frac{\lambda_0}{p(n_{01} - n_{02})}, \quad (10)$$

где  $p=2$  в случае бинарного и  $p=1$  в случае пилообразного рельефа.

В случае однослойной структуры, выполненной из материала с показателем преломления  $n_0$  и расположенной в воздухе, высота микрорельефа, обеспечивающая на длине волны  $\lambda_0$  максимальную ДЭ, равна

$$h' = \frac{\lambda_0}{p(n_0 - 1)}. \quad (11)$$

Очевидно, что при использовании для изготовления рельефно-фазовой микроструктуры любых реально существующих оптических материалов  $h' < h$ .

Из полученного описанным выше способом набора «крон-флинтковых» пар наилучшую (с точки зрения решаемой задачи) можно выбрать, приняв одновременно во внимание высоту микрорельефа, необходимую для достижения на расчетной длине волны максимальной ДЭ, и степень отклонения ДЭ от максимального значения в заданном спектральном диапазоне. Последнюю можно оценить, в частности, по формуле

$$\Delta\eta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^J (\eta_{\max} - \eta_j)^2}{J-1}}, \quad (12)$$

где  $J$  - количество отсчетов внутри спектрального диапазона;  $\eta_{\max}$  - максимальная ДЭ элемента, достигаемая на длине волны  $\lambda_0$ ;  $\eta_j$  - ДЭ элемента на длине волны  $\lambda_j$ .

Здесь необходимо заметить, что, варьируя  $\lambda_0$  (т.е. изменяя высоту микрорельефа) можно минимизировать  $\Delta\eta$  и приблизить среднее значение ДЭ, вычисляемое как

$$\langle \eta \rangle = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \eta_j, \quad (13)$$

к максимально достижимому, т.е. к  $\eta_{\max}$ .

В таблице приведены наиболее значимые параметры рельефно-фазовой микроструктуры с бинарным ( $k=2$ ) и десятиступенчатым ( $k=10$ ) профилем штриха, выполненной из пяти «крон-флинтковых» пар. Показатели преломления и коэффициенты дисперсии стекол приведены на желтой d-линии гелия ( $\lambda_d = 0,58756$  мкм). При этом с ростом номера пары в таблице показатели преломления кронов увеличиваются. Здесь напомним, что при  $k=2$  максимально до-

стижимая ДЭ в первом порядке дифракции  $\eta_{\max} = 0,41$ ,

а при  $k = 10$  максимальное значение ДЭ  $\eta_{\max} = 0,97$ .

№ п/п	Пары стекол	$\lambda_0$ , мкм	$k$	$h$ , мкм	$\langle \eta \rangle$	$\Delta \eta$
1	BACED4 ( $n_d = 1,617652$ ; $v_d = 55$ ) FF5 ( $n_d = 1,592703$ ; $v_d = 35$ )	0,75	2	13,58	0,40	0,02
			10	27,17	0,94	0,05
2	BAF10 ( $n_d = 1,670030$ ; $v_d = 47$ ) E-FD2 ( $n_d = 1,647690$ ; $v_d = 33$ )	0,70	2	14,40	0,40	0,01
			10	28,80	0,94	0,03
3*	СТК19 ( $n_d = 1,744133$ ; $v_d = 50$ ) ТФ8 ( $n_d = 1,689493$ ; $v_d = 31$ )	0,64	2	5,67	0,38	0,03
			10	11,35	0,90	0,08
4	E-LASF08 ( $n_d = 1,88230$ ; $v_d = 41$ ) FD110 ( $n_d = 1,784719$ ; $v_d = 26$ )	0,62	2	3,12	0,38	0,03
			10	6,23	0,89	0,10
5	E65-40 ( $n_d = 1,865000$ ; $v_d = 40$ ) FD6 ( $n_d = 1,805184$ ; $v_d = 25$ )	0,67	2	5,32	0,39	0,02
			10	10,65	0,93	0,05

\*Данная пара предложена в [1].

Анализ распределений ДЭ двухслойных рельефно-фазовых микроструктур в пределах выбранного спектрального диапазона показал, что эти распределения для любой «крон-флинтовой» пары, полученные при различных  $k$ , подобны. Что же касается характера распределения, то он индивидуален для каждой «крон-флинтовой» пары, но отличия, как видно из рис. 5, не очень значительны.

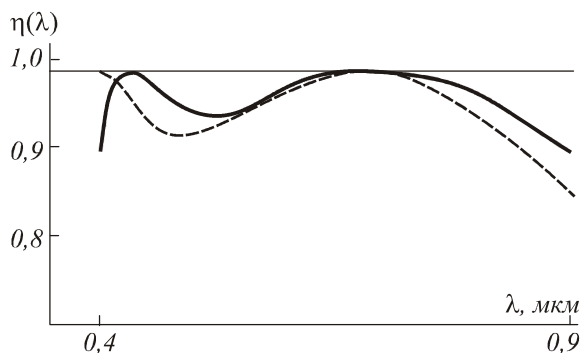


Рис. 5. Распределения ДЭ двухслойных десятиступенчатых рельефно-фазовых микроструктур, выполненных из двух «крон-флинтowych» пар: BACED4/FF5 (—) и E65-40/FD6 (- - -); прямая параллельная оси абсцисс соответствуют максимально достижимому значению ДЭ для выбранного числа ступеней микроструктуры

### Заключение

Как следует из представленной таблицы, платой за стремление обеспечить равномерность ДЭ по заданному спектральному диапазону и одновременно

приблизить ее среднее значение к максимальному для выбранного числа ступеней в микрорельефе является значительная по сравнению с однослойной структурой высота рельефа. В то же время, используя пары стекол, включающие сверхтяжелые кроны, и оптимизируя для каждой пары значение расчетной длины волны  $\lambda_0$ , можно при умеренной высоте микрорельефа получить как среднее значение ДЭ, так и ее равномерность, вполне приемлемыми для большинства применений.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность А.В. Лукину за предоставленные материалы и полезные обсуждения.

### Литература

1. **Лукин, А.В.** Голограммный оптический элемент / А.В. Лукин, К.С. Мустафин, Р.А. Рафиков // Патент РФ № 1271240. - Оpubл. 10. 05. 1996.
2. **Ebstein, S.T.** Achromatic diffractive optical elements // Proceedings SPIE, 1995. - Vol. 2404. - P. 211-216.
3. **Takehiko, Nakai.** Diffractive optical element and optical system having the same // Patent No. US 6,262,846 B1. Date of Patent: Jul. 17, 2001.
4. Canon, Inc site [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.canon.com/do-info/>.
5. **Зайдель А.Н.** Ошибки измерений физических величин // Спб.: Лань, 2005.
6. **Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г.** Оптика дифракционных элементов и систем // Л.: Машиностроение, 1986.

# SELECT OF MATERIALS FOR ACHROMATIZATION OF THE RELIEF-PHASE DIFFRACTION STRUCTURES

*G.I. Greisukh<sup>1</sup>, E.G. Ezhov<sup>1</sup>, S.A. Stepanov<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> Penza State University of Architecture and Construction*

## *Abstract*

The paper describes a selecting technique for materials of a two-layer phase-relief DOE microstructure with the purpose of its so-called “achromatization,” i.e. with lower wavelength dependence of the diffraction efficiency within the required spectral band.

*Keywords:* diffractive optical element, two-layer single-relief sawtooth microstructures, diffraction efficiency, spectral range, optical material.

*Acknowledgements:* The authors are deeply indebted to A.V. Lukin both for his submittals and for his helpful definitions.

*Citation:* Greisukh GI, Ezhov EG, Stepanov SA. Select of materials for “achromatization” of the phase-relief diffractive structures [In Russian]. *Computer Optics* 2008; 32(1): 43-46.

## *References*

- [1] Lukin AV, Mustafin KS, Rafikov RA. The hologram optical element. Patent No. RF 1271240. Date of Patent: May 10, 1996.
- [2] Ebstein ST. Achromatic diffractive optical elements. *Proceedings SPIE* 1995; 2404: 211-216.
- [3] Takehiko Nakai. Diffractive optical element and optical system having the same. Patent No. US 6,262,846 B1. Date of Patent: Jul. 17, 2001.
- [4] Canon. Inc site [Digital resource]. Access mode: <http://www.canon.com/do-info/>.
- [5] Zaidel AN. Errors in measurements of Physical Values: a textbook. [In Russian]. St Petersburg: “LAN” Publisher; 2005.
- [6] Bobrov ST, Greisukh GI, Turkevich YuG. Optics of diffractive elements and systems [In Russian]. Leningrad: “Mashinostroenie” (Mechanical Engineering Industry) Publisher; 1986.