

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АХРОМАТИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация

Приведена методика получения функций распределения пространственной частоты структур дифракционных оптических элементов, обеспечивающих ахроматизацию фокусирующего объектива, состоящего из двух дифракционных элементов. В отличие от известных данная методика позволяет задавать величину минимального периода в структурах элементов и исследовать влияние этой величины на основные параметры объектива, что из-за технологических ограничений на минимальный период особенно важно в случае вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучений. Исследованы взаимозависимости основных параметров фокусирующего дифракционного объектива-ахромата в области мягкого рентгеновского излучения. Основные характеристики такого объектива сопоставлены с соответствующими характеристиками одиночной дифракционной линзы.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, дифракционный дублет, ахроматизация, аксикон, мягкое (длинноволновое) рентгеновское излучение.

Введение

Совершенствование оптических систем, освоение новых, нетрадиционных для оптики спектральных областей требует и нетрадиционных подходов к коррекции хроматизма. Действительно, в системах, предназначенных для видимого диапазона, преимущественной элементной базой которых являются рефракционные линзы, основным приемом исправления хроматизма является использование материалов с различной дисперсией [1]. Однако возможности такого приема существенно ограничены, а их расширение требует использования необычных оптических материалов, которые являются весьма дорогими и имеют, как правило, невысокие эксплуатационные характеристики [2, 3].

С другой стороны, включение в оптическую систему наряду с рефракционными линзами дифракционных оптических элементов (ДОЭ) позволяет как упростить систему, так и отказаться от использования необычных оптических материалов [4-6]. Проблема построения ахроматизированных оптических систем на базе рефракционных линз еще более усугубляется вне видимого диапазона электромагнитного спектра: в инфракрасной (ИК), ультрафиолетовой (УФ), вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) и рентгеновской областях. В дальней ИК- и ВУФ-областях это связано с тем, что каталог используемых материалов ограничивается несколькими единицами [7], а в рентгеновской области – характерными для нее особыми свойствами материалов [8].

В результате рефракционные линзы жесткого (коротковолнового) рентгеновского диапазона должны быть ограничены преломляющими поверхностями с радиусами кривизны в их вершине, составляющими доли микрометра [9]. Что же касается мягкого (длинноволнового) рентгеновского излучения, то его проникающая способность во все вещества, включая воздух, очень мала и не превышает нескольких микрометров [10]. Это, наряду с очень малыми радиусами кривизн преломляющих поверх-

ностей, практически исключает использование рефракционных линз в длинноволновой части рентгеновского диапазона. Таким образом, один из немногих альтернативных путей ахроматизации оптических систем мягкого рентгеновского диапазона состоит в построении их на основе ДОЭ.

Проблеме ахроматизации чисто дифракционных оптических систем посвящен ряд работ (см., например, [11-14]), и, в частности, в работе [14] найдены четыре схемы дифракционных дублетов, скорректированных на две длины волны. Общим для всех этих схем является то, что, в отличие, например, от зонных пластинок Френеля, используемые в схемах ДОЭ имеют ненулевую пространственную частоту в центре их структуры, т.е. являются аксиконами. При этом возможности дифракционных ахроматизированных дублетов, а также сопоставительный анализ фокусирующих свойств систем различных типов приведены для ИК-диапазона (длина волны порядка 10 мкм), когда отношение светового диаметра к длине волны составляет величину порядка 10^4 . В рентгеновском же диапазоне это отношение как минимум на два порядка больше. Данное отношение входит в волновую сферохроматическую аберрацию, выраженную в долях длины волны, и определяет качество фокусировки [15-17]. Поэтому, чтобы оценить возможности использования дифракционного дублета для фокусировки полихроматического излучения рентгеновского диапазона, требуется провести дополнительные исследования. Кроме того, несмотря на последние успехи в лазерной и электронной литографии, в принципе позволяющие изготавливать ДОЭ как для всех поддиапазонов оптического (включая ИК и УФ) [18], так и рентгеновского излучения [19-22], величина минимального периода в структурах элементов оптической системы во многом определяет как достижимую дифракционную эффективность, так и стоимость или даже саму реализуемость системы. Поэтому в данной работе предлагается методика получения функций распределения простран-

ственных частот ДООЭ, позволяющая ахроматизировать систему, рассматривая минимальный период в качестве свободного параметра.

Расчет структур ДООЭ

Из четырех представленных в [14] схем наиболее интересной с точки зрения построения на ее основе фокусирующего объектива, рассчитанного на полихроматическое излучение, является схема, представленная на рис. 1 и отличающаяся тем, что в ней кольцевую апертуру имеет первый ДООЭ, а максимальные пространственные частоты дифракционных структур элементов имеют наименьшие значения.

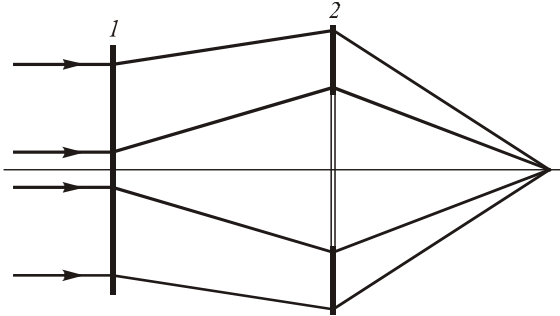


Рис. 1. Оптическая схема дифракционного дублета, скорректированного на две длины волн: 1, 2 – ДООЭ

При построении алгоритма, позволяющего получить функции распределения пространственных частот ДООЭ, обеспечивающие ахроматизацию фокусирующего объектива, будем считать, что оба ДООЭ работают в первом порядке дифракции, а спектральный диапазон, в пределах которого производится ахроматизация, ограничен длинами волн λ' и $\lambda > \lambda'$.

Учитывая, что первый ДООЭ представляет собой аксикон с дополнительными фокусирующими свойствами, а также с целью минимизации числа параметров, определяемых итерационно, в качестве его пространственной частоты примем частоту структуры «обратной» осевой асферизованной голограммы точки

$$\Omega_1(\rho_1) = \frac{1}{\lambda'} \left\{ C - \rho_1 \left[\Omega_H(\rho_1) - \sum_{i=1}^l B_i \rho_1^{i-2} \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь ρ_1 – расстояние от оси структуры в плоскости первого ДООЭ, $\Omega_H(\rho_1)$ – множитель пространственной частоты осевой голограммы точки, зависящий от расстояний от плоскости регистрации до соответствующих источников записи z_1 и z_2 , т.е. отрезков записи первого ДООЭ, определяющих его оптическую силу [15, 16]:

$$\Omega_H(\rho_1) = -\frac{1/z_1}{\sqrt{1+(\rho_1/z_1)^2}} + \frac{1/z_2}{\sqrt{1+(\rho_1/z_2)^2}}. \quad (2)$$

Сразу же отметим, что при работе объектива с бесконечно удаленным предметом $z_1 = -\infty$, а z_2 це-

лесообразно положить равным трем-пяти задним фокальным отрезкам объектива.

Слагаемое в формуле (1), пропорциональное $\sum_{i=1}^l B_i \rho_1^{i-2}$, обеспечивает асферизацию формируемого этим ДООЭ волнового фронта, а константа

$$C = B_0 \rho_{1,max} \left(\Omega_H(\rho_{1,max}) - \sum_{i=1}^l B_i \rho_{1,max}^{i-2} \right) \quad (3)$$

обеспечивает «обращение» пространственной частоты, т.е. ее рост не от оси к краю апертуры ДООЭ, а наоборот.

В формуле (3) $\rho_{1,max}$ – радиус апертуры первого ДООЭ, а коэффициент B_0 определяет расстояние от оси, т.е. центра симметрии структуры, до окружности, на которой пространственная частота структуры обращается в нуль и, как показали исследования, является весьма эффективным коррекционным параметром, влияющим на минимальный период в структуре элементов дублета и его хроматические свойства.

Выбрав функцию распределения пространственной частоты первого ДООЭ в соответствии с формулой (1), поиск значений коэффициентов B_1, \dots, B_l осуществляют итерационно. Соответствующий процесс, целью которого является получение структур ДООЭ, обеспечивающих фокусировку излучения на обеих выбранных длинах волн в одну и ту же фокальную точку, строится на основе прогона хода лучей в плоскости yoZ (см. рис. 2) следующим образом.

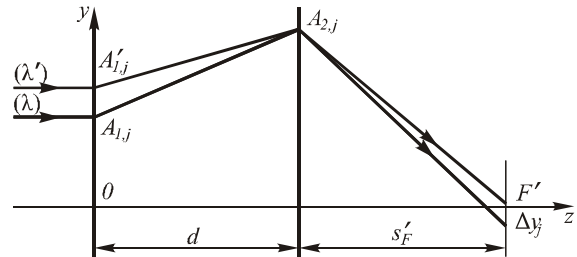


Рис. 2. К расчету пространственной частоты структуры второго ДООЭ

Для расчета хода лучей используются формулы (1)-(3). При этом через некоторую точку первого ДООЭ $A_{1,j}$ с координатой $y_{1,j}$ на длине волны λ из предметной точки, лежащей на оси oZ и отстоящей от первого ДООЭ на конечном или бесконечном расстоянии z_1 , прогоняется луч до пересечения со вторым ДООЭ в точке $A_{2,j}$ с координатой $y_{2,j}$, которую соединяют с фокальной точкой объектива F' .

Затем итерационно на первом ДООЭ находят такую точку $A'_{1,j}$, проходя через которую луч на длине волны λ' также попадет в точку $A_{2,j}$. Направляющие косинусы этого луча и прямой $A_{2,j}F'$ определяют значение пространственной частоты микроструктуры второго ДООЭ в точке $A_{2,j}$:

$$\Omega_{2,j}(\rho_{2,j}) = \frac{\rho_{2,j}(l_{1,j} - l_{2,j})}{\lambda' y_{2,j}}, \quad (4)$$

где $l_{1,j}$ и $l_{2,j}$ – направляющие косинусы луча $A'_{1,j}A_{2,j}$ и прямой $A_{2,j}F'$ относительно оси OY [23].

Далее, используя значение пространственной частоты $\Omega_{2,j}(\rho_{2,j})$, находят точку пересечения с фокальной плоскостью луча на длине волны λ , проходящего через точки $A_{1,j}$ и $A_{2,j}$ и дифрагирующего на втором ДОЭ. Отклонения от фокуса Δy_j , полученные для набора лучей, заполняющих апертуру первого ДОЭ, используются для построения целевой функции, из условия минимизации которой итерационно находятся оптимальные величины коэффициентов B_i ($i = 1, \dots, I$). В качестве целевой функции может быть использован, например, среднеквадратический радиус диаграммы рассеяния лучей δ_{RMS} , а итерационный процесс построен на основе модернизированного метода Ньютона [24].

После завершения итерационного процесса по набору дискретных значений $\Omega_{2,j}(\rho_{2,j})$ методом наименьших квадратов находят коэффициенты полинома, описывающего пространственную частоту второго ДОЭ:

$$\Omega_2(\rho_2) = \sum_{j=1} C_j \rho_2^{j-1}. \quad (5)$$

Исследование дифракционного дублета-ахромата

Результаты исследования взаимозависимости основных параметров фокусирующего дифракционного дублета-ахромата представлены на рис. 3. Здесь $d_R = d/s'_F$ – отнесенный к заднему фокальному отрезку промежуток между двумя ДОЭ; Λ_{min} – минимальный период в квазипериодических структурах первого и второго ДОЭ; δ_{RMS} – среднеквадратический радиус диаграммы рассеяния лучей на центральной длине волны λ_c спектрального диапазона от λ' до λ ; $K_D = D_2/D_1$ – отношение световых диаметров второго и первого ДОЭ; K_S – коэффициент заполнения апертуры второго ДОЭ, вычисляемый по формуле

$$K_S = 1 - (D_2^{(int)}/D_2^{(ext)})^2, \quad (6)$$

где $D_2^{(int)}$ и $D_2^{(ext)}$ – внутренний и внешний диаметры кольцевой апертуры второго ДОЭ.

Результаты, представленные на рис. 3, получены для $\lambda' = 5$ нм, $\lambda_c = 5,5$ нм, $\lambda = 6$ нм, светового диаметра первого ДОЭ $D_1 = 3,5$ мм и при относительном отверстии дублета, под которым в данном случае можно понимать отношение светового диаметра D_1 к заднему фокальному отрезку s'_F , равное 0,1.

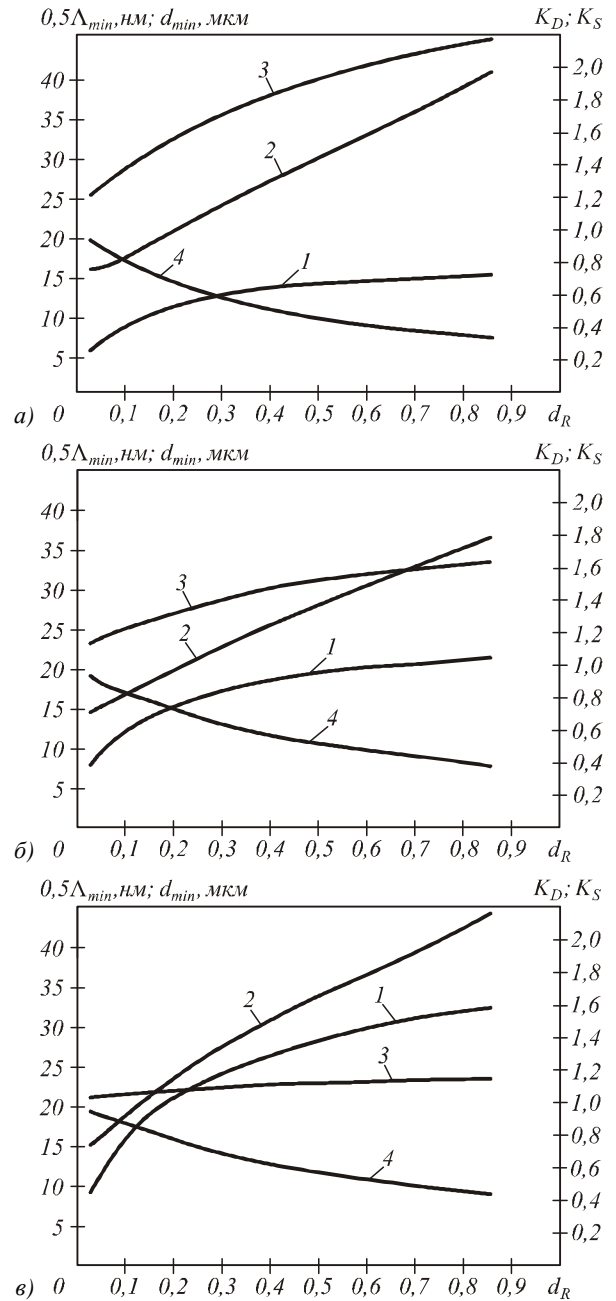


Рис. 3. Графики взаимозависимости основных параметров фокусирующего дифракционного дублета-ахромата (а – при $B_0 = 3$; б – при $B_0 = 2$; в – при $B_0 = 1,2$): 1 – $\Lambda_{min}(d_R)$; 2 – $\delta_{RMS}(d_R)$; 3 – $K_D(d_R)$; 4 – $K_S(d_R)$

При выбранных параметрах итерационный процесс получения оптимальных распределений пространственных частот ДОЭ, завершившийся при достижении требуемого качества фокусировки лучей на длине волны λ ($\delta_{RMS} \leq 100\lambda$), достаточно быстро сходился даже в случае нулевых начальных значений коэффициентов B_1, \dots, B_I . Причем требуемое качество фокусировки легко достигалось уже при $I = 7$.

Как видно из представленных на рис. 3 кривых, минимальный период в структуре Λ_{min} увеличивает-

ся с уменьшением коэффициента B_0 и с ростом промежутка d_R между ДОЭ дублета. Среднеквадратический радиус диаграммы рассеяния лучей δ_{RMS} на центральной длине волны λ_c уменьшается с уменьшением промежутка d_R между ДОЭ. Что же касается зависимости δ_{RMS} от B_0 , то она не является монотонной и оптимальное значение, обеспечивающее минимум δ_{RMS} , лежит внутри диапазона $1,2 < B_0 < 3$.

Относительный световой диаметр второго ДОЭ K_D растет с увеличением промежутка между ДОЭ, но скорость его роста с уменьшением коэффициента B_0 резко замедляется. Наконец, коэффициент заполнения апертуры второго ДОЭ K_S уменьшается с ростом промежутка между ДОЭ дублета и слабо увеличивается с уменьшением коэффициента B_0 .

Результаты исследований, выполненных для ряда относительных отверстий, показали, что при неизменном световом диаметре первого ДОЭ увеличить минимальный период в структуре элементов Λ_{min} , практически не увеличивая при этом размер диаграммы рассеяния лучей, можно путем увеличения габарита дублета, т.е. одновременного увеличения в одинаковое число раз величин d_R и s'_F . Уменьшение же среднеквадратического радиуса диаграммы рассеяния лучей на центральной длине волны λ_c достигается лишь за счет уменьшения светового диаметра первого ДОЭ, что характерно для любой оптической системы, состоящей из дифракционных линз.

Заключение

В заключение сопоставим основные характеристики дифракционного дублета-ахромата с соответствующими характеристиками одиночной дифракционной линзы (ДЛ). Минимальный период в структуре ДЛ при относительном отверстии $D/s'_F \leq 0,2$ с высокой степенью точности может быть рассчитан по формуле

$$\Lambda_{\text{min}} = \frac{2\lambda_c}{D/s'_F}. \quad (7)$$

Следовательно, при $\lambda_c = 5,5$ нм и $D/s'_F = 0,1$ минимальный период в структуре ДЛ $\Lambda_{\text{min}} = 110$ нм, что значительно превышает минимальный период в структурах ДОЭ дублета-ахромата практически при любых возможных сочетаниях коррекционных параметров B_0 и d_R . В то же время, если ДЛ формирует дифракционно-ограниченное изображение на длине волны λ_c , то на длинах волн $\lambda' = 5$ нм и $\lambda = 6$ нм при $D = 3,5$ мм среднеквадратический радиус пятна рассеяния лучей $\delta_{\text{RMS}} \approx 120$ мкм. Таким образом, при выбранных параметрах по пятну рассеяния монохроматического излучения, лежащего в

пределах спектрального диапазона от λ' до λ , дублет-ахромат дает по сравнению с одиночной ДЛ выигрыш как минимум в 2,7 раза.

Для сравнения возможностей фокусировки полихроматического излучения дублетом-ахроматом и одиночной ДЛ рассмотрим дублет с минимальным периодом в структурах $\Lambda_{\text{min}} = 54$ нм [$B_0 = 1,2$; $d_R = 0,43$ (рис. 3б)]. Ширину спектрального диапазона определим из условия равенства среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей монохроматического излучения в центре диапазона и на его краях. Для дублета с выбранными параметрами этот диапазон ограничен длинами волн 4,85 нм и 6,15 нм, а среднеквадратический радиус диаграммы рассеяния лучей полихроматического излучения в пределах этого диапазона $\delta_{\text{RMS}} = 24$ мкм. При фокусировке же полихроматического излучения указанного спектрального диапазона одиночной ДЛ с $D = 3,5$ мм среднеквадратический радиус диаграммы рассеяния $\delta_{\text{RMS}} = 99$ мкм, т.е. при фокусировке полихроматического излучения данный дублет-ахромат дает выигрыш по сравнению с одиночной ДЛ более чем в 4 раза.

Литература

1. **Слюсарев, Г. Г.** Методы расчета оптических систем / Г. Г. Слюсарев. - Л.: Машиностроение, 1969. - 672 с.
2. **Rayces, J.L.** Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary spectrum. I. Tolerance conditions for secondary spectrum, spherochromatism, and fifth-order spherical aberration / J.L. Rayces, M. Rosete-Agilar // Applied Optics. - 2001. - Vol. 40, No 31. - P. 5663-5676.
3. **Rosete-Agilar, M.** Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary spectrum. II. Application of the method for selecting pairs of glasses with reduced secondary spectrum / M. Rosete-Agilar, J.L. Rayces // Applied Optics. - 2001. - Vol. 40, No 31. - P. 5677- 5692.
4. **Ган, М.А.** Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган - Л.: ГОИ, 1984. - 140 с.
5. **Ган, М.** High-speed apo-lens with kinoform element / M. Gan, I. Potyemin, A. Perveev // Proceedings of SPIE. - 1991. - Vol. 1574. - P. 243-249.
6. **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, No 24. - P. 6137-6141.
7. **Бельский, А.Б.** Создание и аттестация флюорита. Перспективы разработки оптических систем для УФ фотолитографии / А.Б. Бельский, М.А. Ган, И.А. Миронов // Международный оптический конгресс «Оптика-XXI век»: сб. трудов. -СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. - С. 9-17.
8. **Блохин, М.А.** Физика рентгеновского излучения / М.А. Блохин. - М.: Гостехиздат, 1957. - 518 с.
9. **Аристов, В. В.** Современные достижения рентгеновской оптики преломления / В.В. Аристов, Л.Г. Шабельников // Успехи физических наук. - 2008. - Т. 178, № 1. - С. 61-83.
10. **Виноградов, А.В.** Зеркальная рентгеновская оптика / А.В. Виноградов, И.А. Брытов, А.Я. Грудский и др.; под общ. ред. А.В. Виноградова. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. - 463 с.
11. **Bennett, S.J.** Achromatic combinations of hologram optical elements / S.J. Bennett // Applied Optics. - 1976. Vol. 15, No 2. - P. 542-545.

12. **Sweatt, W.C.** Achromatic triplet using holographic optical elements / W.C. Sweatt // *Applied Optics*. - 1977. Vol. 16, No 5. - P. 1390-1391.
13. **Weingärtner, I.** Real and achromatic imaging with two planar holographic optical elements / I. Weingärtner // *Optics Communications*. - 1986. - Vol. 58, No 6. - P. 385-388.
14. **Farn, M.W.**, Diffractive doublets corrected at two wavelengths / M.W. Farn, J.W. Goodman // *J. Opt. Soc. Am. A*. - 1991. - Vol. 8, No 6. - P. 860-867.
15. **Бобров, С.Т.** Оптика дифракционных элементов и систем / С. Т. Бобров, Г. И. Грейсук, Ю. Г. Туркевич. - Л.: Машиностроение, 1986. - 223 с.
16. **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.
17. **Грейсук, Г.И.** Сравнительный анализ хроматизма дифракционных и рефракционных линз / Г.И. Грейсук, Е.Г. Езов, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*. - 2005. - Вып. 28. - С. 60-65.
18. **Полещук, А.Г.** Методы изготовления и контроля дифракционных оптических элементов / А.Г. Полещук, В.П. Корольков // Сборник трудов научно-практической конференции «Голография в России и за рубежом. Наука и практика». -М.: ООО «ГОЛОГРАФИЯ-СЕРВИС», 2007. - С. 11-14.
19. **Di Fabrizio, E.** High-efficiency multilevel zone plates for keV X-rays / E. Di Fabrizio, F. Romanato, M. Gentili, S. Cabrini, B. Kaulich, J. Susini, R. Barrett // *Nature*. - 1999. - Vol. 401. - P. 895-898.
20. **Anderson, E.H.** Nanofabrication and diffractive optics for high-resolution x-ray applications / E.H. Anderson, D.L. Olynick, B. Harteneck, E. Veklerov, G. Denbeaux, W. Chao, A. Lucero, L. Johnson, D. Attwood // *J. Vac. Sci. Technol. B*. - 2000. - Vol. 18, Issue 6. - P. 2970-2975.
21. **Аристов, В. В.** Современная рентгеновская оптика высокого разрешения / В.В. Аристов // *Вестник Российской академии наук*. - 2002. - Т. 72, № 1. - С. 963-968.
22. **Nöhammer, B.** Zoneplates for hard X-rays with ultra-high diffraction efficiencies / B. Nöhammer, J. Hoszowska, H.-P. Herzig, C. David // *J. Phys. IV*. - 2003. - Vol. 104. - P. 193-196.
23. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. - М.: Наука, 1973. - 720 с.
24. **Грейсук, Г.И.** Тройные склеенные радиально-градиентные объективы / Г.И. Грейсук, Е.Г. Езов, С.А. Степанов // *Оптический журнал*. - 1999. - Т. 66, № 10. - С. 92-96.
6. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive hybrid corrector for achr- and apochromatic corrections of optical systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. - 2006. - Vol. 45, No 24. - P. 6137-6141.
7. **Belsky, A.B.** Creation and certification of fluorite. Prospects of design of optical systems for UV-photolithography / A.B.Belsky, M.A.Gan, I.A.Mironov // *Proceedings of International Optical Congress "Optics-XXI Century": St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2006*. - P. 9-17. - (in Russian).
8. **Blohin, M.A.** Phisycs of the X-ray radiation / M.A. Blohin - Gostechizdat, 1957. - 518 p. - (in Russian).
9. **Aristov, V.V.** Modern achievements of the refractive X-ray optics / V.V. Aristov, L.G. Shabelnikov // *Advances in Physical Sciences*. - 2008. - V. 178, № 1. - P. 61-83. - (in Russian).
10. **Vinogradov, A.V.** Mirror x-ray optics / A.V.Vinogradov, I.A.Brytov, A.JA.Grudsky, etc.; ed. A. V. Vinogradov. - Leningrad: Mashinostroenie, 1989. - 463 p. - (in Russian).
11. **Bennett, S.J.** Achromatic combinations of hologram optical elements / S.J. Bennett // *Applied Optics*. - 1976. Vol. 15, No 2. - P. 542-545.
12. **Sweatt, W.C.** Achromatic triplet using holographic optical elements / W.C. Sweatt // - *Applied Optics*. - 1977. Vol. 16, No 5. - P. 1390-1391.
13. **Weingärtner, I.** Real and achromatic imaging with two planar holographic optical elements / I. Weingärtner // *Optics Communications*. - 1986. - Vol. 58, No 6. - P. 385-388.
14. **Farn, M.W.** Diffractive doublets corrected at two wavelengths / M.W. Farn, J.W. Goodman // - *J. Opt. Soc. Am. A*. - 1991. - Vol. 8, No 6. - P. 860-867.
15. **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).
16. **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.
17. **Greisukh, G.I.** The comparative analysis of chromatism of the diffractive and refractive lenses/ G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // *Computer Optics*. - 2005. - Iss. 28. - P. 60-65. - (in Russian).
18. **Poleshchuk, A.G.** Methods for fabrication and certification of diffractive optical elements / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov // *Proceedings of the conference "Holography in Russia and aboard. Theory and practice"*. -M.: "HOLOGRAPHY-SERVICE Ltd.", 2007. - P. 11-14. - (in Russian).
19. **Di Fabrizio, E.** High-efficiency multilevel zone plates for keV X-rays / E. Di Fabrizio, F. Romanato, M. Gentili, S. Cabrini, B. Kaulich, J. Susini, R. Barrett // *Nature*. - 1999. - Vol. 401. - P. 895-898.
20. **Anderson, E.H.** Nanofabrication and diffractive optics for high-resolution x-ray applications / E.H. Anderson, D.L. Olynick, B. Harteneck, E. Veklerov, G. Denbeaux, W. Chao, A. Lucero, L. Johnson, D. Attwood // *J. Vac. Sci. Technol. B*. - 2000. - Vol. 18, Issue 6. - P. 2970-2975.
21. **Aristov, V.V.** Modern x-ray optics of the high resolution / V.V. Aristov // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. - 2002. - Vol. 72, No 11. - P. 963-968. - (in Russian).
22. **Nöhammer, B.** Zoneplates for hard X-rays with ultra-high diffraction efficiencies / B. Nöhammer, J. Hoszowska, H.-P. Herzig, C. David // *J. Phys. IV*. - 2003. - Vol. 104. - P. 193-196.
23. **Born, M.** Principles of Optics, 5th ed /M. Born, E. Wolf - N.Y.: Pergamon Press, 1964.
24. **Gresukh, G.I.** Triple cemented radial-gradient objectives / G. I. Gresukh, S. A. Stepanov, E. G. Ezhov // *Journal of Optical Technology*. - 1999. - Vol. 66, Iss. 10. - P. 918-921.

References

1. **Slusarev, G.G.** Methods of the optical systems computing / G.G. Slusarev. - Mashinostroenie, 1969. - 672 p. - (in Russian).
2. **Rayces, J.L.** Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary spectrum. I. Tolerance conditions for secondary spectrum, spherochromatism, and fifth-order spherical aberration / J.L. Rayces, M. Rosete-Agilar // *Applied Optics*. - 2001. - Vol. 40, No 31. - P. 5663-5676.
3. **Rosete-Agilar, M.** Selection of glasses for achromatic doublets with reduced secondary spectrum. II. Application of the method for selecting pairs of glasses with reduced secondary spectrum / M. Rosete-Agilar, J.L. Rayces // *Applied Optics*. - 2001. - Vol. 40, No 31. -P. 5677- 5692.
4. **Gan, M.A.** Theory and methods of the kinoform and holographic optical elements design / M.A. Gan - GOI, 1984. - 140 p. - (in Russian).
5. **Gan, M.** High-speed apo-lens with kinoform element / M. Gan, I. Potyemin, A. Perveev // *Proceedings of SPIE*. - 1991. - Vol. 1574. - P. 243-249.

OPTICAL SYSTEMS WITH DIFFRACTIVE ELEMENTS: WAYS OF THE CHROMATISM CORRECTION

G. I. Greysukh, E. G. Ezhov, S. V. Kazin, S. A. Stepanov
Penza State University of Architecture and Construction

Abstract

We present the method which allows the receiving of the spatial frequency distribution function of the diffractive optical elements which provides achromatization of the focusing objective consisting of two diffractive elements. The given method differs from the known one that it allows the setting of minimal period of spatial frequency of the elements. Besides this method allows the researching the effect of minimal period on objective's key parameters. By reason of technological limits of the minimal period these possibilities are especially important in the case of vacuum ultra-violet and X-ray radiation. Interdependences of the basic parameters of focusing diffractive achromatized doublet were investigated in the range of soft X-ray radiation. The basic performances of such doublet were compared with the same ones of the single diffractive lens.

Key words: diffractive optical element, diffractive doublet, achromatization, axicon, soft X-rays.

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 Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Грейсух Г.И. - специалист в области расчета оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха 130 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств. E-mail: grey@pguas.ru

Grigoriy Isaevich Greysukh (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 Department of Penza State University of Architecture and Construction. G.I. Greysukh 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. E-mail: grey@pguas.ru



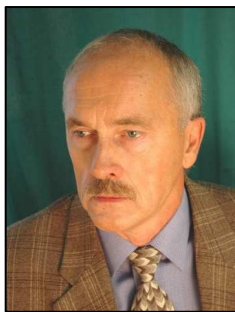
Ежов Евгений Григорьевич, 1977 года рождения. В 1999 году окончил Пензенский государственный университет по специальности «Радиотехника». Доктор физико-математических наук (2008 год), доцент. Работает профессором кафедры информационных систем и компьютерного моделирования Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Специалист в области расчета оптических систем, математического моделирования и защиты информации. В списке научных работ Е.Г. Ежова свыше 50 статей и учебник. E-mail: grey@pguas.ru

Eugeniy Grigorievich Ezhov (b. 1977) graduated (1981) from the 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. E-mail: grey@pguas.ru



Казин Сергей Владимирович, 1988 года рождения. Студент 5 курса Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (специальность «Информационные системы и технологии»). E-mail: grey@pguas.ru.

Sergey Vladimirovich Kazin (b. 1988). The student of the fifth year of the Penza State University of Architecture and Construction (speciality «Information systems and technologies»). E-mail: grey@pguas.ru



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, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления» и профессор кафедры физики Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. Является членом Европейского оптического общества (EOS) и Российского оптического общества им. Д.С. Рождественского. Степанов С.А. – специалист в области расчета оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ С.А. Степанова 80 статей, 2 монографии, 5 авторских свидетельств. E-mail: asut@pguas.ru.

Sergei Alekseevich Stepanov (b. 1951) graduated (1974) from the Kuibyshev State University (presently, Samara State University), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (1999) degrees from Samara State Aerospace University. He is chief of Automated Control Systems Department and professor in the Physics 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 80 scientific papers, 2 monographs, and 5 inventions. E-mail: asut@pguas.ru.

Поступила в редакцию 26 марта 2010