

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

АХРОМАТИЗИРОВАННЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ И ДИФРАКЦИОННО-РЕФРАКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА

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

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация

Проанализированы возможности и определены условия ахроматизации дифракционных и дифракционно-рефракционных систем рентгеновского диапазона. Произведена оценка качества фокусировки при достижении строгой и частичной ахроматизации. Результаты оценки сопоставлены с возможностями одиночной дифракционной линзы.

Ключевые слова: мягкое и жёсткое рентгеновское излучение, ахроматизация, дифракционная линза, рефракционная линза, коэффициент дисперсии, глубина проникновения, дифракционно-рефракционная система, дифракционный дублет-ахромат.

Введение

Создание и совершенствование синхротронных источников, ондуляторов, а также лазеров на свободных электронах, способных формировать узконаправленные пучки рентгеновского излучения, стимулировали интерес к дифракционной оптике этого спектрального диапазона, предназначенной для фокусировки монохроматического излучения или даже формирования протяжённого микроизображения [1].

В то же время ряд областей применения рентгеновского излучения, например, такие как флуоресцентная и абсорбционная спектроскопия, используют полихроматическое излучение. При этом рентгеновское излучение из точек его генерации в накопительном кольце или ондуляторе подводится к фокусирующей оптической системе, а затем к приёмнику излучения или исследуемому образцу по специально оборудованным вакуумным каналам [2].

Очевидно, что возможность и эффективность использования дифракционной оптики в вышеперечисленных областях будет определяться степенью достижимой коррекции хроматизма и теми неизбежными ограничениями, к которым такая коррекция может приводить. При этом речь идёт о коррекции преобладающего у рентгеновских оптических систем (в силу малых числовых апертур и полевых углов) продольного хроматизма, приводящего к тому, что отдельные спектральные составляющие полихроматического излучения фокусируются на разных расстояниях от оптической системы, т.е. к зависимости заднего отрезка оптической системы от длины волны падающего излучения.

В первом приближении подавление продольного хроматизма осуществляют путём ахроматизации, т.е. достижения равенства задних отрезков на двух длинах волн, выбранных вблизи краёв заданного спектрального диапазона [3, 4]. Один из известных путей ахроматизации предполагает построение оптической системы рентгеновского диапазона по схеме, хорошо зарекомендовавшей себя в видимом диапазоне и включающей, наряду с дифракционной

линзой (ДЛ), рефракционные линзы (РЛ) [5-10]. Второй путь заключается в построении фокусирующей системы из нескольких дифракционных оптических элементов (ДОО) со специфическими фокусирующими свойствами [11-15].

1. Дифракционно-рефракционные системы

Ахроматизация гибридной оптической системы, включающей элементы различных типов, достигается благодаря тому, что её элементы имеют существенно отличающиеся дисперсии [5-8]. Оптические силы этих элементов определяются из условия получения заданной оптической силы у системы в целом и условия ахроматизации. Для наглядной оценки возможности ахроматизации и определения основных требований, предъявляемых при этом к элементам оптической системы рентгеновского диапазона, достаточно ограничиться бесконечно тонким приближением, пренебрегая толщинами элементов и промежутков между ними.

В результате для системы, имеющей на центральной длине волны $\bar{\lambda}$ выбранного спектрального диапазона ахроматизации $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ оптическую силу ϕ , вышеперечисленные условия могут быть записаны в виде [3, 4]

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1} \phi_i &= \phi \\ \sum_{i=1} \phi_i / v_i &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где ϕ_i и v_i – оптическая сила на длине волны $\bar{\lambda}$ и коэффициент дисперсии i -го элемента системы.

В случае ДЛ её коэффициент дисперсии [8]

$$v_D = \bar{\lambda} / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}). \quad (2)$$

Коэффициент дисперсии РЛ определяется её материалом [3, 4]:

$$v_R = (n_{\bar{\lambda}} - 1) / (n_{\lambda_{\min}} - n_{\lambda_{\max}}), \quad (3)$$

где n_{λ} – показатель преломления материала РЛ на соответствующей длине волны.

Для оценки достижимого светового диаметра и возможности изготовления РЛ с использованием существующих технологий модуль радиуса преломляющей поверхности, имеющей наибольшую кривизну, удобно представить в виде [4]

$$r = k \left| (n_{\bar{\lambda}} - 1) / \phi_R \right|, \quad (4)$$

где $k = 1$, если одна из преломляющих поверхностей РЛ является плоской, и $k = 2$, если РЛ имеет одинаковые по модулю радиусы кривизны преломляющих поверхностей.

В видимом диапазоне выбор материала РЛ (т.е. марки оптического стекла) определяют в основном параметры n и ν . При выборе же материала рентгеновской РЛ на первый план выдвигается глубина проникновения τ – расстояние, при прохождении которого интенсивность излучения в материале падает примерно на 63% от первоначального значения, т.е. уменьшается в e раз.

В рентгеновском диапазоне вдали от краёв поглощения показатель преломления материала n_{λ} , оставаясь меньше единицы, приближается к ней по квадратичному закону с уменьшением длины волны и по линейному закону с уменьшением плотности электронов в этом материале [16]. Характер же зависимости глубины проникновения рентгеновского излучения в материал определяется выражением $\tau \sim 1 / (Z^4 \lambda^3)$, где Z – атомный номер химического элемента, используемого в качестве материала линзы [17]. Учитывая последнюю закономерность и химическую нестойкость щелочных металлов, одним из наиболее перспективных материалов для рентгеновской рефракционной оптики является бериллий [18, 19]. Однако и при его использовании возникают серьёзные проблемы, обусловленные очень малым отличием показателя преломления от единицы и ограниченностью глубины проникновения излучения. В таблице 1 приведены полученные в [20, 21] значения этих параметров для ряда длин волн.

Таблица 1. Оптические характеристики бериллия

λ , нм	n	τ , мкм
10	0,99833810	0,03
1	0,99977152	17
0,5	0,99994383	140
0,3	0,99997988	691
0,2	0,99999108	2452
0,1	0,99999777	15372

Формула (4) совместно с таблицей 1 показывает, что для получения сколько-нибудь ощутимой оптической силы радиусы кривизны преломляющих поверхностей должны составлять сотни или даже десятки микрометров. Это, в свою очередь, вынуждает для получения приемлемых световых диаметров перейти от сферических преломляющих поверхностей

к параболическим. Нетрудно показать, что в этом случае при заданной оптической силе максимально достижимый (с точки зрения приемлемого пропускания) световой диаметр растёт с уменьшением длины волны по закону $D_{cl} \sim 1/\sqrt{\lambda}$. Поэтому даже при использовании бериллия ахроматизированная дифракционно-рефракционная оптическая система может иметь практически значимые параметры только при работе с излучением, у которого $\bar{\lambda} < 0,3$ нм.

Во всей рентгеновской области спектра коэффициенты дисперсии ДЛ и РЛ отрицательны. Причём, как будет показано ниже, модуль коэффициента дисперсии ДЛ примерно в два раза больше. В силу этого из уравнений (1) следует, что в рентгеновском дублете, имеющем положительную оптическую силу и состоящем из ДЛ и РЛ, ахроматизация достигается, во-первых, только при противоположных знаках оптических сил этих линз и, во-вторых, если оптическая сила ДЛ положительна и примерно в два раза превышает модуль оптической силы отрицательной РЛ. Причём поскольку показатель преломления материала РЛ в рентгеновском диапазоне меньше единицы, то, как минимум, одна из преломляющих поверхностей отрицательной РЛ будет выпуклой (рис. 1).

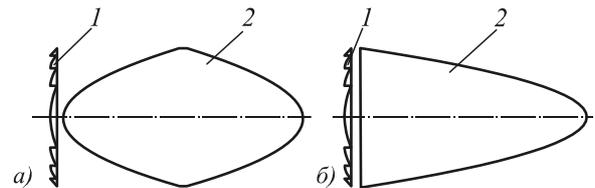


Рис. 1. Дифракционно-рефракционные рентгеновские дублеты с двояковыпуклой (а) и плосковыпуклой (б) параболическими РЛ: 1 – ДЛ; 2 – РЛ

Для оценки достижимой ахроматизации и качества фокусировки ниже исследуются дифракционно-рефракционные системы, рассчитанные на работу в относительном спектральном диапазоне $\Delta\lambda/\bar{\lambda} \approx \pm 0,1$ при $\bar{\lambda} = 0,22$ нм и $\bar{\lambda} = 0,11$ нм. Такая оценка производилась методом расчёта хода лучей с использованием программы оптического проектирования «ZEMAX» [22]. Для этого, также как и в работе [23], с использованием табличных данных, представленных в [21], были получены коэффициенты дисперсионной формулы Шотта:

$$n_{\lambda}^2 = a_0 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda^{-2} + a_3 \lambda^{-4} + a_4 \lambda^{-6} + a_5 \lambda^{-8}. \quad (5)$$

При этом приемлемая аппроксимация достигалась благодаря использованию индивидуальных наборов коэффициентов a_0, \dots, a_5 дисперсионной формулы для каждого из двух вышеуказанных спектральных диапазонов. Значения этих коэффициентов представлены в таблице 2.

В первом из выбранных спектральных диапазонов показатель преломления и коэффициент дисперсии бериллия соответственно равны $n_{\bar{\lambda}} = 0,99998918$

и $v_R = -2,85$, а коэффициент дисперсии ДЛ $v_D = -5,5$. Подставляя приведённые значения коэффициентов дисперсии в уравнения (1), получаем $\phi_R = -1,0734\phi$ и $\phi_D = 2,0734\phi$. Обратившись же к формуле (4), легко видеть, что даже в случае двояковыпуклой РЛ и при весьма значительном фокусном расстоянии дифракционно-рефракционного дублета в целом $f' = 1/\phi = 2000$ мм получаем, что строгая ахроматизация возможна при $r_{\text{req}} = 0,046$ мм. Ограничивая толщину РЛ величиной глубины проникновения $\tau_{\bar{\lambda}} = 1,83$ мм и переходя от сферических преломляющих поверхностей к параболическим (что не нарушает достигнутой ахроматизации) при приведён-

ном значении радиусов кривизны при вершинах параболоидов, используя формулу

$$D_{\text{cl}} = 2\sqrt{r\tau_{\bar{\lambda}}}, \quad (6)$$

получаем следующее значение светового диаметра линзы $D_{\text{cl}} = 0,58$ мм. Как показали исследования, выполненные с использованием компьютерной программы оптического проектирования ZEMAX, при приведённых параметрах качество фокусировки полихроматического излучения не отличается от дифракционно-ограниченного, т.к. интенсивность Штреля в дифракционном изображении $I_{\text{st}} = 0,9$, а среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей $\delta_{\text{RMS}} = 0,4$ мкм.

Таблица 2. Коэффициенты дисперсионной формулы Шотта для бериллия

Коэффициенты формулы Шотта	Спектральный диапазон, нм	
	0,2...0,24	0,11...0,13
	Значения коэффициентов, соответствующие длине волны, измеренной в микрометрах	
a_0	0,949786916	0,998289904
a_1	$2,04324294 \cdot 10^5$	$2,33944779 \cdot 10^4$
a_2	$4,90696003 \cdot 10^{-9}$	$4,83682974 \cdot 10^{-11}$
a_3	$-2,38851978 \cdot 10^{-16}$	$6,73860398 \cdot 10^{-19}$
a_4	$-2,38851978 \cdot 10^{-24}$	$4,62153537 \cdot 10^{-27}$
a_5	$5,79068509 \cdot 10^{-32}$	$1,24749563 \cdot 10^{-35}$

Существующие в настоящее время технологии изготовления бериллиевых рентгеновских линз позволяют получать параболоиды с радиусом кривизны при вершине $r_{\text{tech}} \geq 0,2$ мм [24]. При таком значении радиуса достичь строгой ахроматизации можно, заменив одну РЛ набором из $N \geq r_{\text{tech}}/r_{\text{req}}$ одинаковых линз с суммарной толщиной равной $\tau_{\bar{\lambda}}$. Увеличение числа линз сверх указанного значения позволит в соответствующее число раз увеличить радиус кривизны при вершине параболоидов, но световой диаметр из-за соответствующего уменьшения толщины каждой из линз останется неизменным. Расчёт показал, что ахроматизация, достигаемая при $f' = 2000$ мм, $D_{\text{cl}} = 0,58$ мм, $N = 5$ и $r = 0,23$ мм, обеспечивает такое же дифракционно-ограниченное качество фокусировки, как и в случае дублета с $r_{\text{req}} = 0,046$ мм.

Сопоставимая одиночная ДЛ, имеющая те же значения фокусного расстояния и светового диаметра, позволяет сфокусировать полихроматическое излучение с соответствующей шириной спектра в пятно с $\delta_{\text{RMS}} = 28,3$ мкм, т.е. дифракционно-рефракционная ахроматизированная система при приведённых параметрах даёт примерно семидесятикратный выигрыш в размере сфокусированного пятна. Так как оптическая сила ДЛ ахроматизированной оптической системы приблизительно в два раза превышает оптическую силу системы в целом, то минимальный период пространственной частоты структуры этой ДЛ также приблизительно в два раза окажется меньшим, чем соответствующий период сопоставимой ДЛ. При

принятых выше фокусном расстоянии и световом диаметре ахроматизированной оптической системы ($f' = 2000$ мм, $D_{\text{cl}} = 0,58$ мм) минимальный период её ДЛ $\Lambda_{\text{min}} \approx 0,86$ мкм.

Сокращение фокусного расстояния оптической системы в J раз потребует J -кратного увеличения числа РЛ и уменьшения толщины каждой из них во столько же раз. Последнее же, как следует из формулы (6), приведёт к уменьшению светового диаметра в \sqrt{J} раз. Здесь же отметим, что при уменьшении фокусного расстояния до величин, при которых световой диаметр остаётся практически значимым, качество фокусировки может быть получено дифракционно-ограниченным.

Используя одиночную РЛ с технологически достижимым радиусом кривизны при вершине $r = 0,2$ мм, можно осуществить частичную ахроматизацию и при $f' = 2000$ мм увеличить световой диаметр до $D_{\text{cl}} = 1,21$ мм. Среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей в этом случае окажется не меньшим, чем $\delta_{\text{RMS}} = 24,8$ мкм. Сопоставимая одиночная ДЛ, имеющая те же значения фокусного расстояния и светового диаметра, позволяет сфокусировать полихроматическое излучение с соответствующей шириной спектра в пятно с $\delta_{\text{RMS}} = 59,5$ мкм, т.е. дифракционно-рефракционный дублет при приведённых параметрах даёт более чем двукратный выигрыш в размере сфокусированного пятна.

Если же уменьшить фокусное расстояние дублета до $f' = 250$ мм, а световой диаметр выбрать из усло-

вия сохранения неизменной толщины РЛ ($D_{cl}=0,5$ мм) при дополнительной деформации параболоидов без изменения радиуса кривизны при вершине, то дифракционно-рефракционный дублет позволит уменьшить δ_{RMS} до 9 мкм. Сопоставимая же одиночная ДЛ обеспечивает среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей $\delta_{RMS}=24,6$ мкм, т.е. выигрыш становится примерно трёхкратным. Здесь же отметим, что в этом случае оптическая сила ДЛ частично ахроматизированной оптической системы всего лишь в 1,25 раза превышает оптическую силу системы в целом и, следовательно, минимальный период пространственной частоты структуры этой ДЛ ($\Lambda_{min} \approx 0,18$ мкм) окажется достаточно близким к соответствующему периоду сопоставимой ДЛ.

Отметим, что при отходе от строгой ахроматизации переход к плоско-выпуклой параболической линзе с теми же значениями радиуса кривизны и толщины, что и у выпуклой двояковыпуклой линзы, не приведёт к ухудшению качества фокусировки. Это обусловлено тем, что отрицательное воздействие некоторого роста продольного хроматизма можно полностью скомпенсировать уменьшением отрицательного воздействия сферохроматизма за счёт дополнительной, более существенной деформации параболоида, которая достигается благодаря возможности увеличения толщины плосковыпуклой линзы до толщины двояковыпуклой линзы того же светового диаметра (рис. 1).

При переходе в более коротковолновый спектральный диапазон (табл. 2) в результате приближения показателя преломления бериллия к единице требуемый для строгой ахроматизации дифракционно-рефракционного дублета радиус кривизны преломляющих поверхностей РЛ ещё более уменьшится. Действительно, в этом спектральном диапазоне показатель преломления и коэффициент дисперсии бериллия соответственно равны $n_{\lambda}=0,9999968$ и $\nu_R=-3,02$, а коэффициент дисперсии ДЛ $\nu_D=-6$. Подставляя приведённые значения коэффициентов дисперсии в уравнения (1), получаем $\phi_R=-1,01266\phi$ и $\phi_D=2,01266\phi$. Вновь обратившись к формуле (4), легко видеть, что при фокусном расстоянии дифракционно-рефракционного дублета $f'=2000$ мм даже в случае двояковыпуклой РЛ строгая ахроматизация возможна при радиусах кривизны её преломляющих поверхностей $r_{req}=0,0126$ мм.

Для оценки качества фокусировки вновь перейдём к параболическим преломляющим поверхностям и ограничим толщину двояковыпуклой РЛ величиной глубины проникновения, которая в этом случае равна $\tau_{\lambda}=10,327$ мм. Эти параметры в соответствии с формулой (6) дают для светового диаметра $D_{cl}=0,71$ мм. Если в спектральном диапазоне $\lambda=0,2\dots 0,24$ нм строго ахроматизированный дублет

фокусировал полихроматическое излучение в дифракционно-ограниченном пятно, то в рассматриваемом здесь более коротковолновом спектральном диапазоне дифракционная ограниченность не достигается из-за неустранимого (даже путём деформации параболоидов) сферохроматизма. В результате минимально достижимый среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей $\delta_{RMS}=1,6$ мкм.

Заменяв одну РЛ набором из 17 ($N \geq 0,2/0,0126$) одинаковых линз с радиусом кривизны при вершине $r=0,208$ мм и суммарной толщиной $\tau_{\lambda}=10,327$ мм, сохраним и световой диаметр $D_{cl}=0,71$ мм, и строгую ахроматизацию, и качество фокусировки. Сопоставимая одиночная ДЛ, имеющая те же значения фокусного расстояния и светового диаметра, позволяет сфокусировать полихроматическое излучение с соответствующей шириной спектра в пятно с $\delta_{RMS}=31,7$ мкм. Следовательно, дифракционно-рефракционная ахроматизированная система при приведённых параметрах в этом более коротковолновом диапазоне даёт примерно двадцатикратный выигрыш в размере сфокусированного пятна. Оптическая сила ДЛ ахроматизированной дифракционно-рефракционной системы и в этом случае приблизительно в два раза превышает оптическую силу системы в целом. В результате минимальный период пространственной частоты структуры этой ДЛ также приблизительно в два раза меньше соответствующего периода сопоставимой ДЛ и при $f'=2000$ мм, $D_{cl}=0,71$ мм составляет $\Lambda_{min} \approx 0,36$ мкм.

Рассмотрим теперь возможности фокусировки при частичной ахроматизации дифракционно-рефракционного дублета с плосковыпуклой параболической РЛ, имеющей технологически достижимый радиус кривизны при вершине параболоида $r=0,2$ мм. В этом случае световой диаметр при строго параболической форме преломляющей поверхности РЛ можно увеличить до $D_{cl}=4$ мм и получить среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей $\delta_{RMS}=100$ мкм. Если же параболоид деформировать без изменения радиуса кривизны при его вершине и толщины РЛ, то, например, при световом диаметре $D_{cl}=1,21$ мм размер сфокусированного пятна можно существенно уменьшить и получить $\delta_{RMS}=15,2$ мкм. Сопоставимая одиночная ДЛ, имеющая те же значения фокусного расстояния и светового диаметра, позволяет сфокусировать это полихроматическое излучение в пятно с $\delta_{RMS}=53,8$ мкм. Следовательно, дифракционно-рефракционный частично ахроматизированный дублет при $f'=2000$ мм и в этом, более коротковолновом диапазоне даёт более чем трёхкратный выигрыш в размере сфокусированного пятна. Минимальный период пространственной частоты структуры ДЛ

частично ахроматизированного дублета при вышеуказанных параметрах составит $\Lambda_{\min} \approx 0,22$ мкм.

Если же уменьшить фокусное расстояние дублета до $f' = 250$ мм, а параболоид деформировать, то, например, при световом диаметре $D_{cl} = 0,5$ мм получим $\delta_{RMS} = 7,2$ мкм. Сопоставимая же одиночная ДЛ обеспечивает среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей $\delta_{RMS} = 22,2$ мкм, т.е. выигрыш в размере пятна также оказывается более чем трёхкратным. Минимальный период пространственной частоты структуры ДЛ частично ахроматизированного дублета при $f' = 250$ мм и $D_{cl} = 0,5$ мм равен $\Lambda_{\min} \approx 72$ нм.

2. Дифракционный дублет-ахромат

Проблеме ахроматизации чисто дифракционных оптических систем посвящен ряд работ 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 ДОО имеют ненулевую пространственную частоту в центре их структуры, т.е. являются аксиконами. Из четырёх найденных в [14] схем наиболее интересной с точки зрения построения на её основе фокусирующего объектива, рассчитанного на полихроматическое излучение, является схема, представленная на рис. 2 и отличающаяся тем, что в ней некольцевую апертуру имеет первый ДОО, а максимальные пространственные частоты дифракционных структур элементов имеют наименьшие значения.

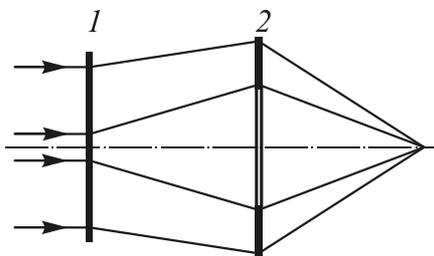


Рис. 2. Оптическая схема дифракционного дублета, скорректированного на две длины волны: 1, 2 – ДОО

В работах [15, 25] предложена методика получения функций распределения пространственных частот ДОО, позволяющая ахроматизировать систему, рассматривая минимальный период в структурах ДОО как свободный параметр. В соответствии с ней в качестве пространственной частоты фронтального ДОО принимается частота структуры «обратной» осевой асферизованной голограммы точки. Пространственные частоты обоих ДОО представляются степенными рядами, коэффициенты которых получают итерационно. Соответствующий процесс, целью которого является получение структур ДОО, обеспечивающих фокусировку излучения на обеих выбранных длинах волн λ_{\min} и λ_{\max} в одну и ту же фокальную точку, строится на основе прогона лучей.

В работе [15] с использованием предложенной авторами методики детально проанализированы взаимозависимости основных параметров короткофокусного ($f' = 35$ мм, $D_{cl} = 3,5$ мм) дифракционного объектива, ахроматизированного в спектральном диапазоне $\lambda = 5 \dots 6$ нм. Здесь же мы оцениваем качество фокусировки полихроматического излучения, которое в принципе может обеспечить дифракционный дублет-ахромат в двух выше выбранных спектральных диапазонах ($\lambda = 0,2 \dots 0,24$ нм) и ($\lambda = 0,11 \dots 0,13$ нм), а также сопоставляем его параметры с соответствующими параметрами дифракционно-рефракционных систем.

Исходные конструктивные параметры дифракционного дублета-ахромата были найдены с использованием разработанного авторами программного обеспечения, реализующего вышеописанную методику, а оптимизация параметров и оценка качества фокусировки осуществлялись, так же, как и в случае дифракционно-рефракционных систем, с использованием программы оптического проектирования «ZEMAX».

В первом из выбранных спектральных диапазонов при фокусном расстоянии $f' = 2000$ мм и световом диаметре $D_{cl} = 0,58$ мм дифракционный дублет-ахромат позволяет сфокусировать полихроматическое излучение в пятно, близкое к дифракционно-ограниченному ($\delta_{RMS} = 1,0$ мкм). Минимальный период пространственной частоты структуры ДОО дублета в этом случае составляет $\Lambda_{\min} \approx 0,134$ мкм. При увеличении же светового диаметра до $D_{cl} = 1,21$ мм среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей становится равным $\delta_{RMS} = 2,3$ мкм, а минимальный период пространственной частоты структуры ДОО уменьшается до $\Lambda_{\min} \approx 65$ нм. При уменьшении фокусного расстояния дифракционного дублета-ахромата до $f' = 250$ мм, а светового диаметра до $D_{cl} = 0,5$ мм, полихроматическое излучение фокусируется в пятно с $\delta_{RMS} = 1,5$ мкм. Минимальный период пространственной частоты структуры ДОО в этом случае становится равным $\Lambda_{\min} \approx 50$ нм.

Во втором, более коротковолновом спектральном диапазоне при фокусном расстоянии $f' = 2000$ мм и световом диаметре $D_{cl} = 0,71$ мм дифракционный дублет-ахромат позволяет сфокусировать полихроматическое излучение в пятно со среднеквадратичным радиусом $\delta_{RMS} = 1,1$ мкм. Минимальный период пространственной частоты структуры ДОО дублета в этом случае составляет $\Lambda_{\min} \approx 61$ нм. При увеличении же светового диаметра до $D_{cl} = 1,21$ мм среднеквадратичный радиус диаграммы рассеяния лучей становится равным $\delta_{RMS} = 2,1$ мкм, а минимальный период пространственной частоты структуры ДОО уменьшается до

35 нм. При уменьшении фокусного расстояния дифракционного дублета-ахромата до $f' \cong 250$ мм, а светового диаметра до $D_{cl} = 0,5$ мм полихроматическое излучение фокусируется в пятно с $\delta_{RMS} = 2,6$ мкм. Минимальный период пространственной частоты структуры ДОО в этом случае становится равным $\Lambda_{min} \cong 72$ нм.

Поскольку в случае дифракционного дублета увеличение светового диаметра не приводит к автоматическому отходу от строгой ахроматизации, как в случае дифракционно-рефракционной системы, то и качество фокусировки при этом значительно не снижается. Ценой же за увеличение светового диаметра является уменьшение размера минимального элемента микроструктуры ДОО дублета до предельно (на сегодняшний день) технологически достижимого [21].

Заключение

Обобщая результаты, представленные в настоящей статье, можно констатировать, что оба рассмотренных подхода к ахроматизации рентгеновских оптических систем, выполненных на основе вращательно-симметричных элементов пропускающего типа, открывают возможности их эффективного использования как в мягком, так и в жестком рентгеновском диапазонах. Тем более, что в жестком рентгеновском диапазоне такие системы окажутся альтернативой фокусирующим системам на изогнутых кристаллах. Качество фокусировки полихроматического рентгеновского излучения, обеспечиваемое рассмотренными системами, при фокусных расстояниях и световых диаметрах, представляющих практический интерес, таково, что размер сфокусированного пятна в зависимости от соотношения этих параметров может составлять единицы микрометров или даже доли микрометра, что практически недоступно для зеркальных систем, особенно если используются системы со скрещенными зеркалами цилиндрической или квазичилиндрической формы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Госконтракт 16.740.11.0145).

Литература

1. **Erko, A.** Modern Developments in X-Ray and Neutron Optics / A. Erko. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2008. – 533 p.
2. **Фетисов, Г.В.** Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ / Г.В. Фетисов. – М.: Физматлит, 2007. – 672 с.
3. **Чуриловский, В.Н.** Теория хроматизма и аберраций третьего порядка / В.Н. Чуриловский. – Л.: Машиностроение, 1968. – 312 с.
4. **Слюсарев, Г.Г.** Методы расчёта оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1969. – 672 с.
5. **Ган, М.А.** Теория и методы расчёта голограммных и киноформных оптических элементов / М.А. Ган. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
6. **Stone, T.** Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // Applied Optics. – 1988. – Vol. 27(14). – P. 2960-2971.
7. **O'Shea, D.C.** Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test / D.C. O'Shea; T.J. Suleski; A.D. Kathman; D.W. Prather. – Bellingham: SPIE Press, 2003. – 260 p.
8. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive hybrid corrector for achromatic and apochromatic corrections of optical systems / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45(24). – P. 6137-6141.
9. **Skinner, G.K.** Design and imaging performance of achromatic diffractive-refractive x-ray and gamma-ray Fresnel lenses / G.K. Skinner // Applied Optics. – 2004. – Vol. 43(25). – P. 4845-4853.
10. **Umbach, M.** Achromatic X-ray focusing using diffractive and refractive elements / M. Umbach, V. Nazmov, M. Simon, A. Last, V. Saile // Proceedings of SPIE. – 2008. – Vol. 7100. – P. 71001U-1-71001U-7.
11. **Bennett, S.J.** Achromatic combinations of hologram optical elements / S.J. Bennett // Applied Optics. – 1976. – Vol. 15(2). – P. 542-545.
12. **Sweatt, W.C.** Achromatic triplet using holographic optical elements / W.C. Sweatt // Applied Optics. – 1977. – Vol. 16(5). – P. 1390-1391.
13. **Weingärtner, I.** Real and achromatic imaging with two planar holographic optical elements / I. Weingärtner // Optics Communications. – 1986. – Vol. 58(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(6). – P. 860-867.
15. **Грейсх, Г.И.** Анализ возможностей ахроматизации оптических систем, состоящих из дифракционных элементов / Г.И. Грейсх, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 187-193.
16. **Als-Nielsen, J.** Elements of Modern X-ray Physics / J. Als-Nielsen, D. McMorrow. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 318 p.
17. **Шпольский, Э.В.** Атомная физика. Т. 1: Введение в атомную физику / Э.В. Шпольский. – М.: Наука, 1984. – 552 с.
18. **Аристов, В.В.** Современные достижения рентгеновской оптики преломления / В.В. Аристов., Л.Г. Шабельников // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 1. – С. 61-83.
19. **Kuznetsov, S.** X-ray optical objective base on Al and Be compound refractive lenses / S. Kuznetsov, I. Snigereva, A. Snigerev, C. Schroer, B. Lengeler // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5539. – P. 200-207.
20. **Henke, B.L.** X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E = 50-30000 eV, Z = 1-92 / B.L. Henke, E.M. Gullikson, J.C. Davis // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1993. – Vol. 54(2). – P. 181-342.
21. X-Ray Properties of the Elements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://henke.lbl.gov/cgi-bin/pert.cgi.pl>
22. ZEMAX: software for optical system design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zemax.com>
23. **Грейсх, Г.И.** Ахроматизированные дифракционно-рефракционные объективы EUV-диапазона / Г.И. Грейсх, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 29-35.

24. **Schroer, C.** Beryllium parabolic refractive x-ray lenses / C. Schroer, M. Kuhlmann, B. Lengeler, T.F. Gunzler, O. Kurapova, B. Benner, C. Rau, A.S. Simionovici, A. Snigirev and I. Snigireva // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4783. – P. 10-18.
25. **Грейсух, Г.И.** Расчёт фокусирующих дифракционных дублетов-ахроматов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Сборник трудов IX международной конференции «Прикладная оптика – 2010». Том 2. СПб, 2010. – С. 249-253.

References

1. **Erko, A.** Modern Developments in X-Ray and Neutron Optics / A. Erko. – Berlin; Heidelberg; New York; Springer, 2008. – 533 p.
2. **Fetisov, G.V.** Synchrotron radiation. Methods for studying the structure of substances / G.V. Fetisov. – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2007. – 672 p. – (In Russian).
3. **Churilovsky, V.N.** The theory of chromatism and third-order aberrations / V.N. Churilovsky. – Leningrad: “Mashinostroenie” Publisher, 1968. – 312 p. – (in Russian).
4. **Slusarev, G.G.** Methods of calculating optical systems / G.G. Slusarev. – Leningrad: “Mashinostroenie” Publisher, 1969. – 672 p. – (In Russian).
5. **Gan, M.A.** Theory and methods of calculating the hologram and kinoform optical elements / M.A. Gan. – Leningrad.: GOI, 1984. – 140 p. – (In Russian).
6. **Stone, T.** Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats / T. Stone, N. George // Applied Optics. – 1988. – Vol. 27(14). – P. 2960-2971.
7. **O’Shea, D.C.** Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test / D.C. O’Shea; T.J. Suleski; A.D. Kathman; D.W. Prather. – Bellingham: SPIE Press, 2003. – 260 p.
8. **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.
9. **Skinner, G.K.** Design and imaging performance of achromatic diffractive-refractive x-ray and gamma-ray Fresnel lenses / G.K. Skinner // Applied Optics. – 2004. – Vol. 43(25). – P. 4845-4853.
10. **Umbach, M.** Achromatic X-ray focusing using diffractive and refractive elements / M. Umbach, V. Nazmov, M. Simon, A. Last, V. Saile // Proceedings of SPIE. – 2008. – Vol. 7100. – P. 71001U-1-71001U-7.
11. **Bennett, S.J.** Achromatic combinations of hologram optical elements / S.J. Bennett // Applied Optics. – 1976. – Vol. 15(2). – P. 542-545.
12. **Sweatt, W.C.** Achromatic triplet using holographic optical elements / W.C. Sweatt // Applied Optics. – 1977. – Vol. 16(5). – P. 1390-1391.
13. **Weingärtner, I.** Real and achromatic imaging with two planar holographic optical elements / I. Weingärtner // Optics Communications. – 1986. – Vol. 58(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(6). – P. 860-867.
15. **Greisukh, G.I.** Analysis of achromatization capabilities of optical systems consisting of diffractive elements / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov // Computer Optics. – 2010. – V. 34, N. 2. – P. 187-193. – (In Russian).
16. **Als-Nielsen, J.** Elements of Modern X-ray Physics / J. Als-Nielsen, D. McMorrow. – New York: John Wiley&Sons, 2001. – 318 p.
17. **Schpolsky, E.V.** Atomic physics, Vol.1: Introduction to atomic physics. / E.V. Schpolsky. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1984. – 552 p. – (In Russian).
18. **Aristov, V.V.** Modern achievements of X-ray refractive optics / V.V. Aristov, L.G. Schabelnikov // Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences). – 2008. – V. 178, N 1. – P. 61-83. – (In Russian).
19. **Kuznetsov, S.** X-ray optical objective base on Al and Be compound refractive lenses / S. Kuznetsov, I. Snigireva, A. Snigirev, C. Schroer, B. Lengeler // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5539. – P. 200-207.
20. **Henke, B.L.** X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E = 50-30000 eV, Z = 1-92 / B.L. Henke, E.M. Gullikson, J.C. Davis // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1993. – Vol. 54(2). – P. 181-342.
21. X-Ray Properties of the Elements [Electronic resource]. – Access Mode: <http://henke.lbl.gov/cgi-bin/pert.cgi.pl>
22. ZEMAX: software for optical system design [Electronic resource]. – Access Mode: <http://www.zemax.com>
23. **Greisukh, G.I.** Diffractive-refractive achromatic objectives for EUV-range / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // Computer Optics. – 2011. – T. 35, N 1. – P. 29-35. – (In Russian).
24. **Schroer, C.** Beryllium parabolic refractive x-ray lenses / C. Schroer, M. Kuhlmann, B. Lengeler, T.F. Gunzler, O. Kurapova, B. Benner, C. Rau, A.S. Simionovici, A. Snigirev, and I. Snigireva // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4783. – P. 10-18.
25. **Greisukh, G.I.** The calculation of the diffraction focusing doublet-achromat / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov // Proceedings of the IX International Conference on “Applied Optics – 2010”, Vol 2. – Saint-Petersburg: 2010. – P. 249-253. – (In Russian).

ACHROMATIC X-RAY DIFFRACTIVE AND DIFFRACTIVE-REFRACTIVE OPTICAL SYSTEMS

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

Abstract

In this paper we analyzed possibilities and requirements of the achromatization of the X-ray diffractive and diffractive-refractive optical systems. The estimation of quality of focusing at the full and partial achromatization is executed. All results were compared with possibilities of the single diffractive lens.

Key words: “soft” and “hard” X-rays, achromatization, diffractive lens, refractive lens, dispersion index, penetration depth, diffractive-refractive optical system, achromatic diffractive doublet.

Сведения об авторах

Грейсх 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. Грейсх Г.И. – специалист в области расчёта оптических систем, дифракционной и градиентной оптики. В списке научных работ Г.И. Грейсуха 130 статей, 3 монографии, 9 авторских свидетельств.

E-mail: grey@pguas.ru.

Grigoriy Isaevitch Greysukh (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 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.



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

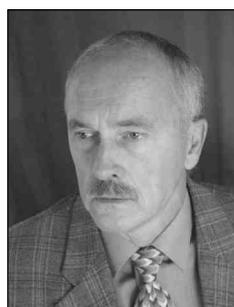
Eugeniy Grigorievich Ezhov (b. 1977) graduated (1999) from the Penza State University majoring in radio engineering. He received his Doctor in Physics & Maths (2008) degrees from Samara State Aerospace University. His current research interests include design of optical systems, mathematical modeling, and data security. He is co-author over 50 scientific papers and tutorial.



Казин Сергей Владимирович, 1988 года рождения. В 2010 году окончил Пензенский государственный университет архитектуры и строительства по специальности «Информационные системы и технологии». Аспирант кафедры физики Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. В списке научных работ С.В. Казина 4 публикации.

E-mail: grey@pguas.ru.

Sergey Vladimirovich Kazin (b. 1988) graduated (2010) from the Penza State University, of Architecture and Construction majoring in information systems and technologies. He is post-graduate of the Physics Department of Penza State University of Architecture and Construction. He is co-author of 4 scientific papers.



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, работает заведующим кафедрой «Автоматизированные системы управления» и профессором 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 расчёта 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.