

07;12

## Потенциальные возможности ахроматизированных дифракционных и дифракционно-рефракционных систем фокусировки рентгеновского излучения

© Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,  
440028 Пенза, Россия

e-mail: grey@pguas.ru; subscribing\_2002@mail.ru

(Поступило в Редакцию 21 июня 2011 г.)

Проанализированы и сопоставлены потенциальные возможности одиночной дифракционной линзы, дифракционного дублета-ахромата и дифракционно-рефракционной системы при фокусировке рентгеновского ондуляторного и лазерного излучений. Качество фокусировки оценивалось по среднеквадратическим радиусам диаграммы рассеяния лучей и радиусам дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника.

### Введение

Создание и совершенствование синхротронных источников новых поколений, а также лазеров на свободных электронах обуславливает практически непрерывный рост требований, предъявляемых к оптическим системам фокусировки рентгеновского излучения. Наиболее распространенной элементной базой фокусировки полихроматического рентгеновского излучения в настоящее время являются зеркальные оптические системы. В мягком рентгеновском диапазоне — это зеркала скользящего падения и многослойные зеркала. В жестком рентгеновском диапазоне — это оптические системы на основе изогнутых кристаллов.

Ограничения, присущие всем зеркальным системам, и прежде всего центральное экранирование, а также проблемы достижения высокого качества фокусировки при использовании систем со скрещенными зеркалами цилиндрической или квазиплоскоцилиндрической формы вынуждают искать альтернативные пути построения фокусирующих оптических систем [1].

Одним из наиболее перспективных путей является использование вращательно-симметричных элементов пропускающего типа — дифракционных линз (ДЛ) и рефракционных линз (РЛ). ДЛ, осуществляющие преобразование волнового фронта в результате дифракции электромагнитной волны на квазипериодической микроструктуре, подобной кольцевой микроструктуре зонной пластинки Френеля, могут использоваться в любой части рентгеновского диапазона. Действительно, существующие технологии изготовления дифракционных микроструктур с большим аспектным отношением позволяют получать элементы с дифракционной эффективностью, достигающей 30%, как в мягком, так и в жестком рентгеновском диапазонах [1,2]. Что касается РЛ, то они могут эффективно работать лишь в жестком рентгеновском излучении. При этом возможности в плане высококачественной фокусировки, представляемые технологиями изготовления дифракционных структур и

преломляющих поверхностей, не могут быть использованы в полной мере из-за значительного хроматизма в рентгеновском диапазоне как ДЛ, так и РЛ.

Разработанные авторами настоящей статьи ахроматизированные рентгеновские гибридные дифракционно-рефракционные оптические системы и системы на основе дифракционных аксиконов с дополнительными фокусирующими свойствами благодаря скорректированному хроматизму позволяют сфокусировать узконаправленные пучки квазимонохроматического рентгеновского излучения в пятна, размеры которых ограничены лишь технологически минимально достижимыми сегодня радиусом кривизны при вершине преломляющей поверхности вращения и пространственным периодом дифракционной микроструктуры. Собственно размеры этих пятен при дифракционно-ограниченном качестве фокусировки в зависимости от характеристик излучения рентгеновского источника (диаметра формируемого источником пучка и относительной спектральной ширины квазимонохроматической линии излучения) могут достигать сотен и даже десятков нанометров, что практически недоступно для зеркальных систем.

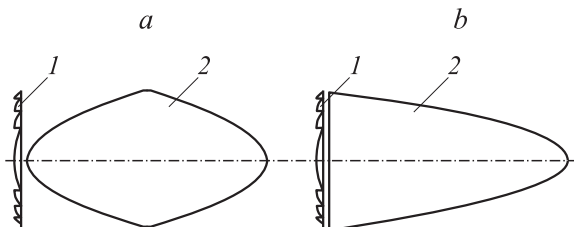
### Фокусирующие дифракционно-рефракционные системы и дифракционный дублет-ахромат

У рентгеновских оптических систем в силу малых числовых апертур и полевых углов преобладающим является продольный хроматизм, приводящий к тому, что отдельные спектральные составляющие квазимонохроматического ондуляторного или лазерного излучения фокусируются на разных расстояниях от оптической системы, т. е. к зависимости заднего отрезка оптической системы от длины волны падающего излучения.

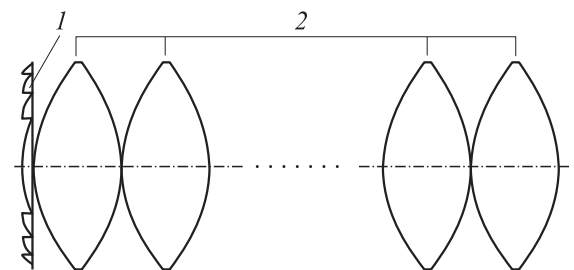
В первом приближении подавление продольного хроматизма осуществляют путем ахроматизации оптиче-

ской системы, т.е. достижения равенства ее задних отрезков на двух длинах волн, выбранных вблизи краев 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 ДЛ одну или несколько РЛ [5–10]. Второй путь заключается в построении фокусирующей системы из нескольких дифракционных оптических элементов (ДОЭ) со специфическими фокусирующими свойствами [11–14].

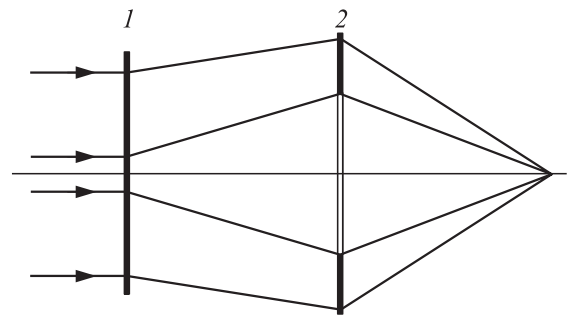
Авторами настоящей работы разработаны принципы компоновки и методика расчета ахроматизированных дифракционно-рефракционных систем фокусировки узких пучков квазимонохроматического жесткого рентгеновского излучения [15]. Эта методика позволяет по заданным характеристикам излучения рентгеновского источника (диаметру фокусируемого пучка, центральной длине волны квазимонохроматической линии и ее относительной спектральной ширине), выбрав предварительно материал РЛ и определив коэффициенты дисперсии этого материала и ДЛ, получить набор исходных параметров фокусирующей ахроматизированной системы для последующей оптимизации. При этом для получения заданного светового диаметра фокусирующей системы преломляющие поверхности РЛ выполняются в виде параболоидов вращения, а для обеспечения возможности изготовления требуемых преломляющих поверхностей одиночная РЛ заменяется набором одинаковых линз (рис. 1, 2).



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



**Рис. 2.** Многоэлементная ахроматизированная дифракционно-рефракционная система фокусировки рентгеновского излучения: 1 — ДЛ, 2 — рефракционная часть, состоящая из нескольких РЛ.



**Рис. 3.** Дифракционный дублет, скорректированный на две длины волн: 1, 2 — ДОЭ.

Учитывая значительное поглощение рентгеновского излучения веществом, толщина РЛ дифракционно-рефракционного дублета, как и суммарная толщина всех РЛ многоэлементной дифракционно-рефракционной системы, ограничивается глубиной проникновения рентгеновского излучения в материал РЛ. Сразу напомним, что за глубину проникновения  $\tau$  принимают расстояние, при прохождении которого интенсивность излучения в материале уменьшается в  $e$  раз.

Оптическая схема дифракционного дублета-ахромата представлена на рис. 3. Это одна из четырех предложенных в работе [14] схем, отличающаяся тем, что в ней элементом с некольцевой апертурой является первый ДОЭ, а максимальные пространственные частоты дифракционных структур элементов имеют наименьшие значения. У обоих ДОЭ дублета в отличие, например, от зонных пластинок Френеля пространственная частота в центре их структур не равна нулю, в результате чего эти ДОЭ представляют собой аксиконы с дополнительными фокусирующими свойствами.

Авторами настоящей работы разработана методика получения функций распределения пространственной частоты структур ДОЭ дифракционного дублета-ахромата [16]. В отличие от известных эта методика позволяет задавать величину минимального периода в структурах элементов и исследовать влияние этой величины на основные параметры дублета, что из-за технологических ограничений на минимальный период особенно важно в случае рентгеновского излучения. С помощью данной методики авторами исследованы взаимозависимости основных параметров дифракционного дублета-ахромата в области мягкого и жесткого рентгеновских излучений [15,16], что и позволило оценить потенциальные (предельные) возможности дублета при его использовании для фокусировки излучения различных рентгеновских источников.

Анализ оптических свойств существующих материалов в рентгеновской области спектра показал, что РЛ могут эффективно работать лишь в коротковолновой части спектра жесткого рентгеновского излучения, начиная примерно с  $\lambda < 0.3 \text{ nm}$  [17]. Поэтому при

фокусировке квазимонохроматического рентгеновского излучения с большими длинами волн разработанный дифракционный дублет-ахромат является фактически безальтернативной фокусирующей ахроматизированной системой пропускаящего типа.

## Результаты сопоставительного анализа потенциальных возможностей фокусирующей рентгеновской оптики различных типов

Сопоставительный анализ потенциальных возможностей одиночной ДЛ, дифракционного дублета-ахромата и дифракционно-рефракционной ахроматизированной системы проводился, опираясь на характеристики излучения существующих и строящихся рентгеновских источников. В их число, в частности, вошли действующий (FLASH) и строящийся (XFEL) германские рентгеновские лазеры на свободных электронах [18], а также источники синхротронного излучения третьего поколения, оборудованные ондуляторами MAX II (Швеция) [19], ESRF (Франция) и SP-8 (Япония) [20].

Показано, что при фокусировке наиболее узкой из квазимонохроматических линий ( $\Delta\lambda/\bar{\lambda} = 0.0008$ ), формируемой ондулятором SASE I строящегося рентгеновского лазера XFEL, (центральная длина волны  $\bar{\lambda} = 0.1$  nm, диаметр пучка  $D = 0.2$  nm), одиночная ДЛ (с технологически минимально достижимым сегодня пространственным периодом дифракционной микроструктуры  $\Lambda_{\min} = 80$  nm [2] и соответствующим вышеприведенным значениям параметров  $\bar{\lambda}$ ,  $D$  и  $\Lambda_{\min}$  расстоянием от ДЛ до плоскости фокусировки  $f'_0 = 80$  nm) будет формировать дифракционно-ограниченное пятно (интенсивность Штреля  $I_{St} > 0.9$ ) с радиусом диска Эйри  $\delta_A = 49$  nm [21]. Уменьшение минимального периода микроструктуры ДЛ до  $\Lambda_{\min} = 46.9$  nm ( $f'_0 = 46.9$  nm) позволит наряду с понижением интенсивности Штреля до критического значения ( $I_S = 0.8$ ) уменьшить радиус диска Эйри дифракционно-ограниченного пятна до  $\delta_A = 28.6$  nm.

При фокусировке излучения источников синхронного излучения третьего поколения (MAX II, ESRF и SP-8), а также рентгеновского лазера FLASH возможности одиночной ДЛ весьма ограничены: среднеквадратический радиус диаграммы рассеяния лучей не опускается ниже  $0.45 \mu\text{m}$ , а дифракционно-ограниченное качество фокусировки достигается при радиусе диска Эйри не меньшем  $0.7 \mu\text{m}$ . Указанный радиус почти на порядок превышает достижимый даже сегодня минимальный период микроструктуры ДЛ, т.е. технологические возможности изготовления высокочастотных дифракционных структур, достигнутые в последние годы, фактически не используются. Это, хотя и в меньшей степени, касается фокусировки и тех квазимонохроматических линий, которые должны формироваться ондуляторами SASE II и SASE III строящегося рентгеновского лазера XFEL.

Поэтому улучшить качество фокусировки излучения практически всех рассмотренных рентгеновских источников можно лишь путем замены одиночной ДЛ ахроматизированной фокусирующей системой.

Действительно, как показали исследования, дифракционный дублет-ахромат при фокусировке, в частности, восьмой гармоники излучения ондулятора синхротронного источника третьего поколения MAX II с центральной длиной зоны квазимонохроматической линии  $\bar{\lambda} = 2.59$  nm и ее относительной спектральной шириной  $\Delta\lambda/\bar{\lambda} = 0.01$  при диаметре пучка  $D = 1$  mm формирует дифракционно-ограниченное пятно с радиусом диска Эйри  $\delta_A = 49$  nm при интенсивности Штреля  $I_{St} \approx 0.9$ . Выигрыш, даваемый дублетом при фокусировке этой гармоники по сравнению с одиночной ДЛ, оцененный по отношению среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей,  $V_1 \approx 41$ , а оцененный по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника,  $V_2 \approx 20$ .

При фокусировке третьей гармоники излучения рентгеновского лазера FLASH с центральной длиной волны квазимонохроматической линии  $\bar{\lambda} = 4.6$  nm и ее относительной спектральной шириной  $\Delta\lambda/\bar{\lambda} = 0.015$  при диаметре пучка  $D = 0.3$  mm дублет-ахромат формирует дифракционно-ограниченное пятно с радиусом диска Эйри  $\delta_A = 58$  nm при интенсивности Штреля  $I_{St} \approx 0.9$ . Выигрыш, даваемый дублетом при фокусировке этой гармоники по сравнению с одиночной ДЛ, оцененный по отношению среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей,  $V_1 \approx 24$ , а оцененный по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника,  $V_2 \approx 15$ .

При фокусировке пятой гармоники излучения рентгеновского лазера FLASH с центральной длиной волны квазимонохроматической линии  $\bar{\lambda} = 2.75$  nm и ее относительной спектральной шириной  $\Delta\lambda/\bar{\lambda} = 0.036$  при диаметре пучка  $D = 0.3$  mm дублет-ахромат формирует дифракционно-ограниченное пятно радиусом диска Эйри  $\delta_A = 80$  nm при интенсивности Штреля  $I_{St} \approx 0.85$ . Выигрыш, даваемый дублетом при фокусировке этой гармоники по сравнению с одиночной ДЛ, оцененный по отношению среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей,  $V_1 \approx 32$ , а оцененный по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника,  $V_2 \approx 26$ .

Наконец, при фокусировке излучения, формируемого ондулятором SASE III строящегося рентгеновского лазера XFEL с центральной длиной волны квазимонохроматической линии  $\bar{\lambda} = 6.4$  nm и ее относительной спектральной шириной  $\Delta\lambda/\bar{\lambda} = 0.0073$  при диаметре пучка  $D = 0.2$  mm дублет-ахромат формирует дифракционно-ограниченное пятно с радиусом диска Эйри  $\delta_A = 63$  nm при интенсивности Штреля  $I_{St} > 0.9$ . Выигрыш, даваемый дублетом при фокусировке этого ондуляторного излучения по сравнению с одиночной ДЛ, оцененный по отношению среднеквадрати-

ческих радиусов диаграмм рассеяния лучей,  $V_1 = 36$ , а оцененный по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника,  $V_2 \approx 4.4$ .

В качестве материала для РЛ дифракционно-рефракционных систем фокусировки тонких пучков квазимонохроматического жесткого рентгеновского излучения формируемого ондуляторами действующих синхротронных источников третьего поколения, был выбран бериллий. Глубина проникновения в бериллий излучения с центральной длиной волны квазимонохроматической линии  $\bar{\lambda} = 0.225 \text{ nm}$ , формируемого ондулятором синхротронного источника ESRF, равна  $\tau_{\bar{\lambda}} = 1.708 \text{ mm}$ , а показатель преломления  $n_{\bar{\lambda}} = 0.99998914$ . Для излучения, формируемого ондулятором синхротронного источника SP-8 с  $\bar{\lambda} = 0.0976 \text{ nm}$ , глубина проникновения и показатель преломления соответственно равны  $\tau_{\bar{\lambda}} = 16.18 \text{ mm}$  и  $n_{\bar{\lambda}} = 0.999997889$ .

Здесь отметим, что данные об оптических свойствах материалов в рентгеновском диапазоне, в том числе и бериллия, представлены, в частности, в [22]. Они получены на основе работы [23], опирающейся на исследования, проведенные в Центре рентгеновской оптики Берклевской лаборатории им. Лоуренса (Lawrence Berkeley Lab, Ctr Xray Opt). Авторами настоящей работы эти данные использовались для получения дифракционно-рефракционных оптических систем [15].

Исследование ахроматизированных дифракционно-рефракционных систем с бериллиевой рефракционной частью показало, что при фокусировке излучения ондулятора синхротронного источника ESRF с относительной шириной квазимонохроматической линии излучения  $\Delta\lambda/\bar{\lambda} = 0.028$  ( $\bar{\lambda} = 0.225 \text{ nm}$ ) и диаметром пучка  $D = 0.5 \text{ mm}$ , дифракционно-рефракционная система формирует дифракционно-ограниченное пятно с радиусом диска Эйри  $\delta_A = 1 \mu\text{m}$  при интенсивности Штреля  $I_{St} > 0.9$ . Выигрыш, даваемый такой системой по сравнению с одиночной ДЛ, оцененный по отношению среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей  $V_1 \approx 16$ , а по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника  $V_2 \approx 3.5$ . При этом дифракционный дублет-ахромат обеспечивает дифракционно-ограниченное качество фокусировки этого же излучения в пятно с радиусом диска Эйри  $\delta_A = 160 \text{ nm}$  при интенсивности Штреля  $I_{St} > 0.9$ . Выигрыш, даваемый дифракционным дублетом-ахроматом по сравнению с ахроматизированной дифракционно-рефракционной фокусирующей системой, оцененной по отношению среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей  $V_1 \approx 3.3$ , а по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника  $V_2 \approx 6$ . При фокусировке излучения ондулятора синхротронного источника SP-8 с относительной шириной квазимонохроматической линии излучения  $\Delta\lambda/\bar{\lambda} = 0.007$  ( $\bar{\lambda} = 0.0976 \text{ nm}$ ) и диаметром пучка  $D = 0.5 \text{ mm}$  ахроматизированная дифракционно-рефракционная система

формирует дифракционно-ограниченное пятно с радиусом диска Эйри  $\delta_A = 257 \text{ nm}$  при интенсивности Штреля  $I_{St} > 0.98$ . Выигрыш, даваемый ахроматизированной дифракционно-рефракционной системой по сравнению с одиночной ДЛ, оцененный по отношению среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей,  $V_1 \approx 37$ , а по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника  $V_2 \approx 2.7$ . При этом дифракционный дублет-ахромат обеспечивает дифракционно-ограниченное качество фокусировки этого же излучения в пятно с радиусом диска Эйри  $\delta_A \approx 144 \text{ nm}$  при интенсивности Штреля  $I_{St} > 0.99$ . Выигрыш, даваемый дифракционным дублетом-ахроматом по сравнению с ахроматизированной дифракционно-рефракционной фокусирующей системой, оцененный по отношению среднеквадратических радиусов диаграмм рассеяния лучей,  $V_1 \approx 1.7$ , а по отношению радиусов дисков Эйри дифракционно-ограниченных изображений точечного источника  $V_2 \approx 1.8$ .

## Заключение

Сопоставительный анализ возможностей дифракционного дублета-ахромата и одиночной ДЛ при фокусировке рентгеновского излучения синхротронных источников третьего поколения (MAX II, ESRF и SP-8) и лазеров на свободных электронах (FLASH и XFEL), представленный в настоящей работе, показал, что дифракционный дублет-ахромат способен формировать дифракционно-ограниченное изображение бесконечно удаленного точечного источника с радиусом диска Эйри порядка минимального периода в дифракционных микроструктурах, близкого к сегодняшнему технологическому барьеру, независимо от спектральной ширины квазимонохроматической линии излучения рассмотренных источников. При относительной спектральной ширине квазимонохроматической линии излучения  $\Delta\lambda/\bar{\lambda} < 0.0018$  выигрыш в качестве фокусировки за счет использования дифракционного дублета-ахромата можно получить только за счет преодоления существующего технологического барьера, ограничивающего минимально достижимый пространственный период дифракционной микроструктуры ( $\Lambda_{\min} = 80 \text{ nm}$ ). При одинаковых световых диаметрах выигрыши  $V_1$  и  $V_2$  растут с увеличением относительной спектральной ширины квазимонохроматической линии излучения и в максимуме, соответствующем излучению действующего рентгеновского лазера FLASH с центральной длиной волны квазимонохроматической линии  $\bar{\lambda} = 2.75 \text{ nm}$ , достигают сорока и двадцати четырех крат соответственно.

В коротковолновой части спектра жесткого рентгеновского излучения наряду с чисто дифракционными могут эффективно использоваться и фокусирующие гибридные дифракционно-рефракционные оптические системы. И, как показал анализ, при фокусировке ахромати-

зированной дифракционно-рефракционной системой излучения, формируемого ондуляторами синхротронных источников третьего поколения ESRF и SP-8, размер дифракционно-ограниченного сфокусированного пятна снизу ограничен особенностями оптических свойств материала РЛ в рентгеновском диапазоне. Эти особенности включают небольшую глубину проникновения излучения в материал, сильную дисперсию с коэффициентом дисперсии того же знака, что и у ДЛ и близость к единице показателя преломления. При этом показатель преломления, оставаясь меньше единицы, приближается к ней по квадратичному закону с уменьшением длины волны, а глубина проникновения рентгеновского излучения в материал растет с уменьшением длины волны по кубическому закону. В результате переход от излучения ондулятора ESRF к излучению ондулятора SP-8 позволяет уменьшить почти в 2 раза фокусное расстояние ахроматизированной дифракционно-рефракционной оптической системы, при котором достигается дифракционно-ограниченное качество фокусировки. Поскольку при таком переходе вместе с фокусным расстоянием уменьшается и длина волны, то радиус диска Эйри уменьшается от  $1 \mu\text{m}$  до  $257 \text{ nm}$ , т.е. почти в 4 раза.

При фокусировке дифракционным дублетом-ахроматом излучения, формируемого ондуляторами синхротронных источников третьего поколения ESRF и SP-8, в силу достаточно узкой спектральной линии квазимонохроматического излучения этих ондуляторов, ограничение на радиус диска Эйри связано прежде всего с существующим технологическим барьером на размер минимального элемента в дифракционной структуре ( $\Lambda_{\text{min}} = 80 \text{ nm}$ ). В результате по сравнению с ахроматизированной дифракционно-рефракционной фокусирующей системой дифракционный дублет-ахромат способен сфокусировать дифракционно-ограниченное пятно с существенно меньшим радиусом диска Эйри. Однако в силу отмеченного выше технологического барьера выигрыш, оцениваемый по отношению радиусов диска Эйри, уменьшается с уменьшением длины волны. В частности, при переходе от излучения ондулятора ESRF к излучению ондулятора SP-8 выигрыш, оцениваемый по отношению радиусов диска Эйри, уменьшается с 6 до 2.7 раз.

Таким образом, и дифракционные дублеты-ахроматы, и ахроматизированные дифракционно-рефракционные фокусирующие системы действительно могут эффективно использоваться для фокусировки излучения современных рентгеновских источников. Целесообразность же выбора системы того или иного типа зависит от характеристик фокусируемого излучения и, в первую очередь, от значения центральной длины волны квазимонохроматической линии излучения и ее спектральной ширины.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кад-

ры инновационной России“ на 2009–2013 гг. (Госконтракт 16.740.11.0145).

## Список литературы

- [1] Modern Developments on X-Ray and Neutron Optics/ Ed. by A. Erko. Berlin: Springer, 2008. 533 p.
- [2] X-Ray optics. <http://www.x-ray-optics.com>.
- [3] Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
- [4] Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
- [5] Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ, 1984. 140 с.
- [6] Stone T., George N. // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 4. P. 2960–2971.
- [7] O'Shea D.C., Suleski T.J., Kathman A.D., Prather D.W. Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test. Bellingham: SPIE Press, 2003. 260 p.
- [8] Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A. // Appl. Opt. 2006. Vol. 45. N 24. P. 6137–6141.
- [9] Skinner G.K. // Appl. Opt. 2004. Vol. 43. N 25. P. 4845–4853.
- [10] Umbach M., Nazmov V., Simon M., Last A., Saile V. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 7100. P. 7100U-1–7100U-7.
- [11] Bennett S.J. // Appl. Opt. 1976. Vol. 15. N 2. P. 542–545.
- [12] Swett W.C. // Appl. Opt. 1977. Vol. 16. N 5. P. 1390–1391.
- [13] Weingärtner I. // Opt. Commun. 1986. Vol. 58. N 6. P. 385–388.
- [14] Farn M.W., Goodman J.W. // J. Opt. Am. A. 1991. Vol. 8. N 6. P. 860–867.
- [15] Грейсукх Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 2. С. 188–195.
- [16] Грейсукх Г.И., Ежов Е.Г., Казин С.В., Степанов С.А. // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 2. С. 187–193.
- [17] Арустов В.В., Шабельников Л.Г. // УФН. 2008. Т. 178. № 1. С. 61–83.
- [18] X-Ray free-electron lasers. <http://www.xfel.desy.de>.
- [19] Characterization of undulator radiation at MAX II. <http://www.cern.ch/accelconf/e98/PAPERS/MOP25G.PDF>.
- [20] Synchrotron Radiation for Materials Science Application. <http://www.coe.berkeley.edu/AST/srms>.
- [21] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- [22] X-Ray Properties of the Elements. <http://henke.lbl.gov/cgi-bin/pert.cgi.pl>.
- [23] Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. // Atom. Data Nucl. Data. 1993. Vol. 54. N 2. P. 181–342.