

Повторяя эти же рассуждения применительно к верхнему звену.

Предложенная схема разбиения притирающихся поверхностей плоского инструмента и правильника позволила получить аналитические выражения для определения координат опорных

точек на этих поверхностях, что необходимо при моделировании процесса обработки в условиях свободного притирания, обеспечивающего равномерное распределение путей трения по рабочей поверхности инструмента и гарантирующего стабильность ее плоскостности.

УДК 548.732

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кольчевская И.Н., Сацункевич А.Е., Петров П.В., Кольчевский Н.Н.

Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Разработана структурная схема программного комплекса для моделирования рентгенооптических систем, в приближении геометрической оптики методом Монте-Карло. Основная идея заключается в создании отдельных вычислительных модулей, взаимодействующих между собой по средствам файлов данных рентгеновских лучей. Применение данного программного комплекса позволяет задействовать вычислительные мощности многоядерных компьютеров, компьютерные сети и супер ЭВМ, что позволит осуществить когерентный расчет рентгенооптических систем.

**Ключевые слова:** рентгеновская оптика, численное моделирование, метод Монте-Карло.

## SOFTWARE FOR SIMULATION OF X-RAY SYSTEMS

Kolchevskay I., Satsunkevich A., Petrov P., Kolchevsky N.

Belarusian State University  
Minsk, Belarus

**Abstract.** Developed a structural scheme of the software package for simulation of X-ray optical systems, in the approximation of geometric optics using the Monte Carlo method. The main idea is to create separate calculation modules, interacting with each other by using X-ray data files. The use of this software complex allows to increase the computing capacity of multicore computers, computer networks and supercomputers, which will allow to make the coherent simulation of the X-ray optics systems.

**Key words:** X-ray optics, mathematical modeling, Monte Carlo method.

Адрес для переписки: Кольчевский Н.Н., ул. Курчатова, 1, к. 62, г. Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Использование преломляющей оптики в рентгеновской и гамма области спектра долгое время считалось невозможным из-за огромного фокусного расстояния и значительного поглощения излучения материалом линзы. Развитие источников излучения привело к появлению синхротронов 3 и 4 поколения (табл. 1), лазеров на свободных электронах (табл. 2) и нового вида преломляющей оптики, основанной на большом количестве преломляющих поверхностей.

Таблица 1. Синхротроны 3 и 4 поколения

Название	Местоположение	Год	Поколение	Энергия, ГэВ	Эмиттанс, нм*рад
Sirius	Бразилия, Сан-Паулу	2018	4	3	0,28
MAX IV	Швеция, Лунд	2016	4	3	0,33
NSLS-II	США, Брукхейвен	2015	3	3	0,55
SESAME	Иордания, Эль-Балка	2015	3	2,5	24,6
TPS	Китай, Синьчжу	2014	3	3	1,7
PLS-II	Корея, Пхохан	2012	3	3	5,8
ALBA	Испания, Барселон	2011	3	3	4,3
PETRA-III	Германия, Гамбург	2010	3	6	4
SPring-8	Япония, Хёго	1997	3	8	3
APS	США, Чикаго	1995	3	7	3
ESRF	Франция, Гренобль	1994	3	6	4

Таблица 2. Лазеры на свободных электронах

Название	Местоположение	Год запуска	Энергия, ГэВ	Яркость пиковая	Диапазон (Å)
XFEL	Германия, Гамбург	2017	17,5	$8,7 \cdot 10^{33}$	0,5–10
SWISS FEL	Швейцария, Филлиген	2016	2,1–5,8	$2,0 \cdot 10^{32}$	7–70; 1–7
FERMI	Италия, Триест	2016	1,5	$1,0 \cdot 10^{27}$ @ 32 нм $2,0 \cdot 10^{23}$ @ 4 нм	40–200; 200–1000
PAL FEL	Республика Корея, Пхохан	2016	3, 10	$5,0 \cdot 10^{31}$	10–100; 0,6–7
SACLA	Япония, Хёго	2011	5,1–8,5	–	0,63–2
LCLS	США, Стэнфорд	2009	2,2–15	$1,0 \cdot 10^{33}$	1,3–50
FLASH	Германия, Гамбург	2006	0,5–1,25	$2,0 \cdot 10^{30}$	41–450

Появились новые рентгенооптические элементы. Источники рентгеновского и гамма диапазона уникальные и дорогостоящие, тем самым проведение экспериментов с их использованием сложны в реализации. Таким образом возникает необходимость в моделировании экспериментов при помощи программных комплексов. Для решения задачи моделирования рентгенооптических систем предлагается использовать модульный принцип.

Модули представляют собой самостоятельные программы, входными и выходными данными для которых являются распределения полей. Элементарный вычислительный комплекс должен содержать программы: Источник, Детектор, Объект и Программы рентгенооптических элементов (щели, волноводы, линзы, отражатели) (рис. 1).

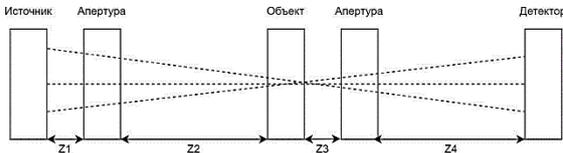


Рисунок 1 – Оптическая схема программного комплекса

Каждая программа должна иметь возможность удаленной загрузки данных и возможность удаленной передачи результатов расчета. Отдельные модули взаимодействуют посредством передачи данных, могут быть запущены параллельно на большом числе компьютеров, что позволит значительно увеличить вычислительную мощность и реализовать процесс оптимизации отдельных рентгенооптических элементов или рентгеновской исследовательской схемы.

В среде программирования Rad Studio 10.4.2. Delphi разработаны две модульные программы: источник «X-RAY TUBE» и волновод «WASXR». Файлы входных данных для программы волновода «WASXR», генерируются при помощи программы источника «X-RAY TUBE». Сгенерированные лучи программой источника сохраняются в текстовый файл, где каждая строка описывает один сгенерированный луч, а каждый элемент строки – это параметр луча.

Программа «Источник» – отдельный программный модуль. Генерирует лучи с заданными начальными параметрами, используя возможности параллельного вычисления компьютера (рис. 2).

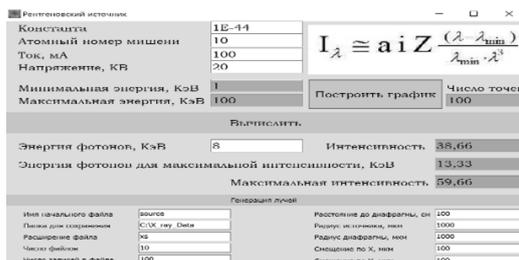


Рисунок 2 – Интерфейс программы «Источник»

Программа источника задает спектр тормозного рентгеновского излучения в приближении толстой мишени без учета самопоглощения (рис. 3), форму, размер и положение источника и выходной диафрагмы. Также есть возможность вывести на экран график интенсивности от энергии для сгенерированного набора лучей, вывести распределение точек на источнике (рис. 4) и лучей на диафрагме.

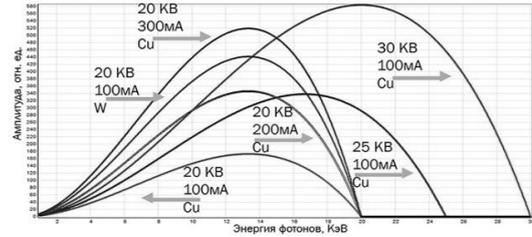


Рисунок 3 – Спектр тормозного рентгеновского излучения при разных начальных данных

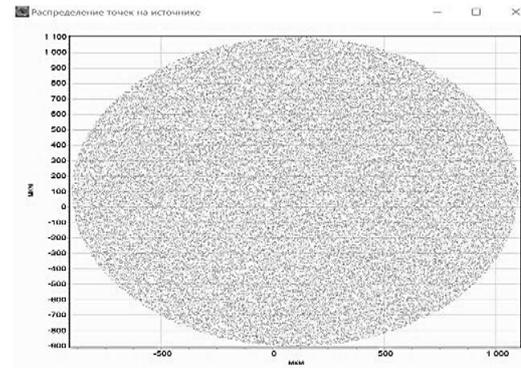


Рисунок 4 – Распределение точек на источнике



Рисунок 5 – Интерфейс программы «Волновод WASXR»

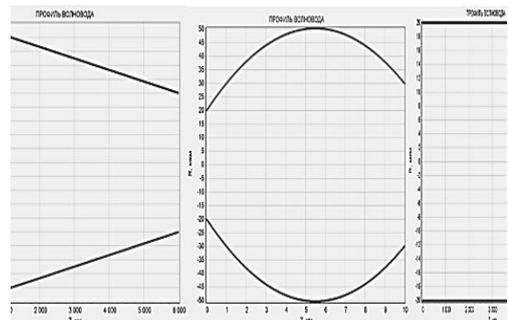


Рисунок 6 – Виды волноводов: конусообразный, параболический, цилиндрический

Расчет интенсивности происходит по формуле (1), где  $\alpha$  – константа,  $i$  – ток электронов в трубке,  $Z$  – атомный номер мишени,  $\lambda$  – длина волны,  $\lambda_{\text{MIN}}$  – минимальная длина волны.

$$I = aiZ \frac{\lambda - \lambda_{\text{MIN}}}{\lambda^3 \lambda_{\text{MIN}}} \quad (1)$$

Программа «Волновод «WASXR»» – использует данные лучей для расчета распространение

лучей в волноводе в приближении геометрической оптики. Уравнение поверхности волновода, ориентация, материал определяют пространственное и угловое распределение лучей на выходе волновода, что сохраняется в текстовых файлах (рис. 5). В программе при помощи задания функции мы можем получить волноводы различной формы (рис. 6). При помощи модульной системы источника и волновода были проведены численные эксперименты, при различных изменениях источника. Программные модули позволяют исследовать возможности рентгено-оптических элементов и систем на их основе.

#### Литература

1. Dudchik, Yu. I., Kolchevsky N.N., Komarov F.F. Microcapillary X-ray lens as a novel design of the refractive lens / Yu. I. Dudchik, N. N. Kolchevsky, F. F. Komarov // SPIE Proceedings. – Vol. 4766–2002.
2. Ladd, M. Structure Determination by X-ray Crystallography. Analysis by X-ray and Neutrons / M. Ladd, R. Palmer. – Springer. – P. 784.
3. Attwood, D. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation / D. Attwood. – Cambridge. – 1999.
4. Мишетт, А. Оптика рентгеновского излучения / А. Мишетт. – М.: Мир, 1989. – 352 с.
5. Kumakhov, M. A. Optics of beams / M. A. Kumakhov. – 1993. – Vol. 1. – P. 3–17.

УДК 681.7.054.22

### ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ СКЛЕЙКИ ЛИНЗ Кузнецов А.В.<sup>1,2</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** В работе приводятся результаты разработки универсального автоколлимационного прибора для контроля погрешностей центрирования оптических систем на базе СТ-41.

**Ключевые слова:** склейка линз, контроль, оптическая система.

### DEVICE FOR CONTROLLING THE ACCURACY OF LENS FUSION Kuznetsov A.<sup>1,2</sup>, Fedortsev R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

<sup>2</sup>JSC “PELENG”

Minsk, Belarus

**Abstract.** The paper presents the results of the development of a universal autocollimation device for monitoring the centering errors of optical systems based on ST-41.

**Key words:** bonding lenses, control, optical system.

Адрес для переписки: Фёдорцев Р.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

В наши дни развитие оптического приборостроения требует создания светосильных оптических систем, которые способны формировать изображение в пределах большого углового поля в пространстве предметов. Высокие требования к параметрам оптических систем и к качеству образованного ими изображения определяют сложность их конструкции. Объективы проекционной фотолитографии или объективы камер профессионального телевидения содержат десятки линз, к качеству изготовления которых предъявляются жесткие требования.

По определению центрированной оптической системой является оптическая система, в которой центры кривизны сферических поверхностей и центры симметрии асферических поверхностей расположены на одной прямой, называемой оптической осью системы. При изготовлении оптических систем неизбежно возникают погрешности центрирования. Они могут возникать непосредственно при формо-

образовании самой оптической детали, при склеивании оптических деталей, при установке оптических деталей в оправы, при сборке ряда оптических компонентов в единую оптическую систему.

Среди зарубежных приборов для контроля погрешностей центрирования на сегодняшний день можно выделить следующие:

1. Приборы серии OptiCentric фирмы Trioptics GmbH (Германия).

2. Приборы серии OTS фирмы OEG GmbH (Германия).

3. Прибор Point Source Microscope фирмы Davidson Optronics (США).

Изучение принципиальных схем данных приборов, а также анализ их возможностей и технических характеристик позволил определить требования и тенденции современного оптического производства.

Цель данной работы – повышение точности метода склейки линз и контроля качества выход-