

## Заключение

Диссертационного совета Д 520.009.01 по диссертации Поликарпова Максима Валерьевича «Алмазные преломляющие линзы для лазероподобных рентгеновских источников», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований

### 1) Получены следующие результаты:

- Экспериментально показана возможность применения метода лазерной абляции для изготовления планарного ансамбля, одиночных и двумерных алмазных преломляющих рентгеновских линз с апертурами более 1 мм. Абляция лазерами с пикосекундной длительностью импульса позволила изготовить линзы со среднеквадратичной высотой шероховатости обрабатываемой поверхности на уровне 1 мкм. Использование лазеров с фемтосекундной длительностью импульса улучшило качество поверхности линзы и уменьшило шероховатость до 0.3 мкм.
- Линзы были исследованы различными взаимодополняющими неразрушающими методами контроля, такими как: оптическая и сканирующая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, трехмерная сканирующая лазерная конфокальная микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, рентгеновская томография и радиография, высокоразрешающая рентгеновская топография и рентгеновская интерферометрия. Все линзы прошли проверку как в фокусирующем, так и в изображающем режимах на лабораторных источниках рентгеновского излучения и на высокоинтенсивных источниках СИ третьего поколения. В ходе тестов была успешно реализована эффективная фокусировка рентгеновского излучения изготовленными алмазными линзами, и впервые проведены эксперименты по рентгеновской микроскопии алмазными линзами с разрешением 1 мкм.
- Были проанализированы преимущества и недостатки моно- и поликристаллического типов алмазного материала для изготовления рентгенооптических элементов. Показано, что поликристаллический алмаз вследствие своей зернистой структуры вносит негативные локальные возмущения в волновой фронт излучения, тогда как использование монокристаллического алмаза позволяет в значительной степени их устранить. Дополнительно впервые исследовано и выявлено дифракционное влияние монокристаллического материала на оптические свойства линзы. Предложен способ минимизации данного влияния.
- Проведены теоретические расчеты и компьютерное моделирование влияния различных искажений профиля линз, возникающих из-за особенностей

процесса лазерной абляции, на их оптические свойства. Показано, что наличие поступательных, т.е. плавных отклонений радиуса параболического профиля от заданного, при движении пучка лазера от периферии линзы к её центру, и периодических отклонений от идеального профиля, особенно при амплитуде отклонения порядка 0.5% и больше от радиуса кривизны параболы, оказывает существенное негативное влияние на оптические характеристики линз. Данные расчетов хорошо согласуются с полученными автором экспериментальными результатами по фокусировке синхротронного излучения с помощью алмазных линз. Отмечено, что указанные искажения профилей могут быть практически полностью устранены при применении фемтосекундных лазеров.

- Исследована возможность пост-обработки поверхностей алмазных одномерных полу-линз сфокусированным ионным пучком и показано, что данный метод дополнительной обработки позволяет существенно уменьшить шероховатости поверхности линз (от исходного значения примерно 0.7 мкм до величины ~ 0.1 мкм).
- Предложен, разработан и реализован новый метод фильтрации высших гармоник рентгеновского излучения при использовании вне-осевого освещения преломляющих рентгеновских линз. На примере излучения с энергиями 9 и 27 кэВ и составной линзы из девяти бериллиевых линз с радиусом 1 мм было продемонстрировано подавление интенсивности излучения 3-й гармоники в тысячу раз. Дополнительно, был предложен и применен новый метод количественного анализа присутствия высших гармоник в падающем рентгеновском излучении, основанный на использовании кремниевого монокристалла.

## **2) Теоретическая значимость исследования обоснована следующим:**

- Впервые методами теоретических расчетов и компьютерного моделирования исследовано влияние возможных искажений профиля поверхности преломляющей линзы на её оптические свойства. Используя данный подход, показана связь поступательного и периодического отклонений профиля поверхности линзы с размерами и яркостью формируемого изображения.
- В работе впервые системно исследован вопрос и сделаны количественные оценки негативного влияния рассеяния рентгеновского излучения атомной периодической структурой монокристаллического материала линзы на её фокусирующие свойства.

## **3) Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается следующим:**

- Реализованные лазерные технологии обеспечивают прямой способ изготовления алмазных преломляющих линз с большой апертурой, высоким

качеством профиля и субмикронной шероховатостью поверхности. Оптические свойства алмаза, в сочетании с его тепловыми свойствами (высокая теплопроводность, низкий коэффициент расширения, высокая температурная стабильность) позволяют применять такие линзы на высокомоощных пучках современных и будущих источников рентгеновского излучения.

- Так как алмазные преломляющие линзы являются принципиально новым объектом исследований, в работе был подробно изучен вопрос метрологии вогнутой поверхности линз неразрушающими методами контроля, произведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков каждого из рассмотренных методов, предложены рекомендации по их применению.
- В диссертационной работе апробирован новый метод фильтрации и регистрации высших гармоник рентгеновского излучения. Он не уступает в производительности существующим аналогам, но превосходит их по легкости экспериментальной реализации, а потому уже сегодня имеет важное практическое применение.

**4) Достоверность результатов исследования основывается на следующих положениях:**

- В работе использовались общепризнанные и современные экспериментальные методы, реализованные на сертифицированных измерительных установках в ведущих научных центрах как в России, так и за рубежом.
- Полученные результаты хорошо воспроизводимы и согласуются с современными теоретическими представлениями. Они не противоречат известным ранее литературным данным и дополняют их.
- Результаты работы были неоднократно опубликованы в престижных международных журналах и апробированы на профильных российских и международных научных конференциях, семинарах и школах.

**5) Личный вклад автора состоял в анализе литературы по исследуемой тематике и принятии прямого участия в проектировке рентгенооптических элементов, постановке производственных задач и выборе методов и технологий для их решения. Автор сыграл важную роль в проведении всех экспериментов по тестированию линз, в том числе на источниках синхротронного излучения, детально освоив методику проведения синхротронного эксперимента. Получаемые результаты обсуждались диссертантом с изготовителями изделий с целью улучшения и доработки производственного процесса. Автор произвел систематизацию, анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных. При непосредственном участии диссертанта, была произведена разработка теории по влиянию ошибок профиля на оптические свойства линзы. Автор готовил публикации к печати и представлял результаты научной работы на научных конференциях, семинарах и школах.**

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация Полицарпова М.В. «Алмазные преломляющие линзы для лазероподобных рентгеновских источников», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842.

На заседании 20 апреля 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Полицарпову М.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности, участвовавших в заседании из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение ученой степени – 15

против присуждения ученой степени – 0

недействительных бюллетеней – 2.

Протокол счетной комиссии утвержден единогласно.