

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФВД РАН

Академик РАН Бражкин В.В.

«11» ноября 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу **Дигурова Романа Валерьевича**
«Дифракционные и упругие свойства тонких изогнутых алмазных пластин»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного
состояния

Актуальность темы диссертационной работы

Современная алмазная рентгеновская оптика находится в стадии бурного развития и в настоящее время представляет собой новое направление в науке и технике. Особенно это касается использования элементов рентгеновской оптики из алмазов для работы в мощных пучках излучения синхротронных источников (СИ) нового поколения и лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Гигантская мощность и яркость рентгеновских пучков таких источников ограничивает и даже делает невозможным использование для производства рентгенооптических элементов монокристаллов кремния и германия. Преимущества алмаза очевидны и хорошо известны. Это его высокая теплопроводность, радиационная стойкость, химическая инертность, прозрачность для рентгеновских лучей и при этом беспрецедентно высокий коэффициент брэгговского отражения (99%).

Большим потенциалом для создания целой серии рентгенооптических устройств обладают тонкие (<100 мкм) упруго изогнутые пластины из структурно совершенных монокристаллов алмазов. Главной причиной, ограничивающей область применения таких изогнутых пластин в качестве элементов рентгеновской оптики, является отсутствие детальной информации об их дифракционных и энергодисперсионных свойствах. Исследование этих свойств проведено в диссертационной работе Романа Валерьевича Дигурова. Часть диссертационной работы посвящена изучению упругих свойств алмаза, что исключительно важно, поскольку это связано с недостаточной изученностью поведения алмаза в условиях большой кривизны пластин, т.е. при рекордно малых радиусах их изгиба (<10 мм). При таком сильном изгибе неизбежно в решетке алмаза будут возникать значительные напряжения, которые необходимо будет учитывать при проектировании конкретного рентгенооптического элемента с учетом возникновения тепловых полей вследствие воздействия на дифрагирующий кристалл мощных рентгеновских пучков. В этой связи требуется знание допустимых значений деформаций, выше которых будет происходить разрушение пластин.

Следует особо отметить, что в настоящее время в нашей стране начаты работы по созданию новых сверхъярких источников рентгеновского излучения (проекты «СИЛА», Протвино; «СКИФ», Новосибирск), где в качестве элементов рентгеновской оптики могут быть использованы тонкие упруго изогнутые алмазные пластины, что делает диссертационную работу Р. В. Дигурова особенно актуальной.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Создание элементов рентгеновской оптики на основе тонких упруго изогнутых кристаллов алмаза, работа которых основана на эффектах спектрального разложения и дифракционной фокусировки рентгеновских лучей.

– Проведено экспериментальное определение полей упругих напряжений в изогнутой тонкой алмазной пластине.

– Использование локального метода Лауэ для исследования дифракционных свойств алмаза. Установлена связь теории упругости анизотропного кристалла (алмаза) с теорией дифракции рентгеновских лучей в первом приближении.

– Уточнен коэффициент пропорциональности для случая одноосного растяжения алмаза в формуле для расчета напряжений методом комбинационного рассеяния света (КРС) по частотному сдвигу.

– Получена экспериментальная кривая в геометрии на «просвет» тонкой изогнутой алмазной пластины на дифрактометре высокого разрешения.

– По отражению характеристических линий $AgK\alpha_1$ и $AgK\alpha_2$ лабораторного источника впервые удалось in-situ определить радиус кривизны алмазной пластины.

– Предложена модель фокусировки рентгеновского пучка в геометрии Лауэ на базе изогнутого монокристалла алмаза с толщиной, сравнимой с глубиной экстинкции, учитывающая наличие профиля деформации.

Практическая значимость

Результаты исследования дифракционных и дисперсионных свойств тонких изогнутых алмазных пластин с разной ориентацией поверхности и различными радиусами изгиба могут быть использованы при проектировании многоканальных рентгенодисперсионных спектрометров и монохроматоров в геометрии как на отражение, так и на просвет, предназначенных для работы в широком диапазоне энергий ($5 \div 50$) кэВ. Кроме того, изогнутые кристаллы алмаза с однородным профилем деформации могут быть использованы в качестве фокусирующих элементов (1D и 2D) для рентгеновской микроскопии и локального рентгенодифракционного анализа с высоким пространственным разрешением и чувствительностью. Разработанная методика по определению радиусов кривизны пластин и деформации кристаллической решетки «под

пучком» позволит быстрее юстировать рентгенооптические элементы в лабораторных условиях.

Достоверность полученных результатов

Достоверность теоретической части, которая присутствует во всех главах диссертационной работы, подтверждается экспериментальными результатами, полученными с помощью современных диагностических методов. Эксперименты проводились с использованием современного диагностического оборудования; установки регулярно проходили процедуры калибровки и технический осмотр. Результаты исследований были опубликованы в высокорейтинговых научных изданиях и доложены на международных конференциях, где получили поддержку специалистов в исследуемой области.

Введение отражает актуальность, научную новизну и практическую значимость работы. В нём также сформулированы цель, задачи работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы по выбранной тематике исследования. Дано подробное описание областей применения изогнутых кристаллов в рентгеновской оптике и энергодисперсионной спектроскопии. Показаны проведенные к настоящему моменту исследования дифракционных свойств изогнутых кристаллов.

Во второй главе решается частная задача для случая чистого изгиба кристалла с переменным сечением и граничными условиями консольного типа. Эксперименты по хрупкому разрушению тонких алмазных пластин позволили определить критические значения упругих напряжений для ориентации поверхности (111) – 2.5 ГПа, для ориентации (110) – 2.8 ГПа и предельные радиусы изгибов (4.8 мм и 5.7 мм соответственно). Распределение полей упругих напряжений на поверхностях и в объеме определялись из результатов моделирования в программе конечно-элементного анализа Ansys. Были решены

две осесимметричные задачи контактного взаимодействия, которые позволили откалибровать клиновидный ползунок специально разработанной конструкции.

В третьей главе представлено исследование дифракционных и дисперсионных свойств тонких изогнутых алмазных пластин. Экспериментально показано, что их дисперсионные свойства однородны на всей рабочей области, а удлинение пятен Лауэ линейно зависит от радиуса кривизны и диаметра рентгеновского пучка. Дается описание разработанной методики определения радиусов изгиба и относительной деформации кристаллической решетки по отражению характеристических линий $AgK\alpha_1$ и $AgK\alpha_2$ лабораторного источника. Экспериментально уточнен коэффициент пропорциональности в формуле для расчета одноосного напряжения методом КРС. На основании установленной связи теории упругости анизотропного тела в первом приближении с теорией дифракции рентгеновских лучей можно рассчитать разброс $\Delta\theta$, связанный исключительно с деформационным вкладом.

В четвертой главе обсуждаются трудности и ограничения, связанные с моделированием Лауэ фокусировки. Предложена модель для 1D фокусировки, в которой в конечную интенсивность посредством написанного макроса подгружается кривая дифракционного отражения, смоделированная на основе мульти ламеллярной теории. Далее была произведена нормировка на фотоны для реального лабораторного источника.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы по проведённому исследованию.

Личный вклад автора

Основные результаты исследований, представленные в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором были сформулированы цель и задачи исследований, по их результатам подготовлены материалы для конференций и публикаций. Соискатель лично проводил

эксперименты по статическому нагружению монокристаллов алмаза, принимал участие в экспериментах по исследованию алмазных пластин локальным дифракционным методом Лауэ и дифрактометрии высокого разрешения. Анализ результатов и теоретическое моделирование, представленные в 2,3,4 главах, проводились лично Дигуровым Р.В.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Замечания по диссертационной работе:

1. Описанию экспериментальных результатов по комбинационному рассеянию света не хватает детализации. Например, интересно было бы знать сколько точек содержат экспериментальные кривые, так как пики на графиках выглядят довольно острыми.
2. Не приведены убедительные доказательства преимущества алмазных элементов перед кремниевыми при применении в качестве рентгенооптических элементов. На стр. 36 и рис. 12б приведены данные, показывающие, что по энергетическому разрешению кремний практически не уступает. Алмазные элементы должны существенно превосходить кремниевые при работе в высокоэнергетических пучках, однако в работе не приведены соответствующие расчеты и сравнение этих структур с точки зрения энергетической нагрузки на кристалл при работе в сверхъярких пучках.
3. В обзорной части работы рассмотрен довольно узкий спектр альтернативных алмазу материалов, используемых в качестве рентгенооптических элементов, фактически, только кремний и германий. Было бы уместно дать обзор места алмаза во всем спектре применяемых материалов и технологий, в том числе и многослойных оптических элементов.

4. Во второй главе, где описываются упругие свойства изогнутых кристаллов алмаза, отсутствует информация о величине сагиттального прогиба, создаваемого при изгибе в разработанной конструкции.

Отмеченные замечания носят уточняющий характер, не ставя под сомнения основные выводы и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Дигурова Романа Валерьевича «Дифракционные и упругие свойства тонких изогнутых алмазных пластин» является самостоятельным и законченным исследованием. В рамках данной научной работы были получены новые результаты, которые имеют как научный, так и практический интерес. На базе изогнутых кристаллов алмаза возможно создание серии рентгенооптических устройств, работающих в геометрии на просвет, в частности, фокусирующих Лауэ монохроматоров, широкодиапазонных спектрометров, имеющих большую перспективу практического применения на современных источниках СИ 4-го поколения. Достигнутые результаты позволяют легче анализировать и настраивать такие устройства, что обеспечит универсальность рентгенооптических модулей с точки зрения их адаптации для работы на конкретных станциях с учетом расстояния от источника до исследуемого образца, параметров пучка ондуляторного излучения, степени его когерентности. Работа соответствует специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 4 печатных работах, которые входят в международные базы Web of Science, Scopus и перечень ВАК.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявленным к кандидатским диссертациям Положением о порядке присуждения ученых степеней в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный

исследовательский технологический университет МИСИС», а ее автор, Дигуров Роман Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Дигурова Р.В. была доложена и обсуждена, отзыв ведущей организации заслушан и одобрен на семинаре Лаборатории перспективных материалов и технологий ИФВД РАН (протокол № 5/2024 от 28 октября 2024 г.).

Отзыв составил:



Антанович А.А.

к.ф.-м.н., заведующий Лабораторией перспективных материалов и технологий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина

Российской академии наук»

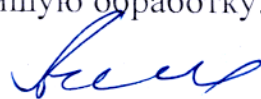
108840, Москва, Троицк, Калужское ш., д.14

тел: +7(495)851-0582

факс: +7(495)851-0012

11 ноября 2024 г.

Я, Антанович Александр Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и на их дальнейшую обработку.



Антанович А.А.