

Отзыв официального оппонента

На диссертацию Элиовича Яна Александровича
«Времяразрешающая рентгенодифракционная диагностика перспективных
кристаллических материалов», представленную к защите на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.18 - «Кристаллография, физика кристаллов»

Диссертация Элиовича Я.А. посвящена разработке нового подхода к проведению рентгенодифракционных экспериментов, позволяющего проводить быстрое управление параметрами эксперимента непосредственно во время проведения измерений, а также изучать динамику структурных изменений в кристаллах с временным разрешением.

Задача проведения экспериментов по исследованию динамики наномасштабных процессов является одной из наиболее актуальных проблем рентгеноструктурного анализа и может быть реализована как в центрах использования синхротронного излучения (СИ), так и на лабораторных источниках рентгеновского излучения. Развитие рентгеновских методов исследований за последние десятилетия характеризуется в первую очередь проектированием и созданием новых источников СИ, включая наиболее современные синхротронные источники четвертого поколения и лазеры на свободных электронах. Высокая яркость и временная структура пучка последних привела к существенному развитию pump-probe экспериментов, позволяющих достичь временного разрешения вплоть до фемто- и даже аттосекунд. Это направление полностью перекрывает наиболее «быстрый» временной диапазон, однако чрезвычайно высокая яркость может приводить к разрушению объекта исследований, поэтому в случае многократных повторов возникает задача подготовки большого числа абсолютно идентичных образцов.

С другой стороны, происходит активное развитие детектирующей аппаратуры, используемой при проведении рентгеновских экспериментов. К ним относятся специальные burst-детекторы для сверхбыстрой регистрации при проведении экспериментов на лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) и современные двухкоординатные детекторы. Они дают возможность регистрации структурных изменений в изучаемых образцах с частотой вплоть до сотен Гц и обеспечивают тем самым не только пространственное, но и временное разрешение. Однако такие детекторы не позволяют проводить непрерывную регистрацию происходящих изменений в течение длительного времени из-за аппаратной специфики и перегрузки буферных систем, а сложность и массивность не позволяют оснащать такими детекторами широкий круг экспериментальных приборов. К тому же, они не перекрывают диапазон временных разрешений от долей секунд до микросекунд, представляющий интерес для значительного числа физических процессов.

С целью заполнения этого пробела в существующих методах в диссертации Элиовича Я.А. предложена новая методика проведения экспериментов с временным разрешением вплоть до микросекунд с помощью специальных элементов рентгеновской оптики – изгибных элементов. Их ключевыми особенностями являются возможность вариации экспериментальной конфигурации непосредственно во время проведения экспериментов, а также отсутствие гистерезиса угловой перестройки от значений управляющего напряжения. Все это определяет **актуальность** выбранной темы диссертации.

Диссертационная работа Элиовича Я.А. состоит из 128 страниц, содержит введение, пять глав, а также заключение, 44 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 134 наименований.

В первой главе содержатся обзорные сведения по тематике диссертации. Приведено развернутое описание актуальности научной тематики работы, а

также обзор направлений, которые могут решить поставленные в рамках работы задачи. В первой главе также содержатся ключевые сведения об истории развития адаптивной рентгеновской оптики.

Вторая глава посвящена ключевым элементам предлагаемой методики – адаптивным изгибным элементам рентгеновской оптики. Приведены результаты тестирования таких элементов в лабораторных условиях и на синхротронной станции, подробно описана методика проведения измерений, получены численные оценки возможных диапазонов угловой перестройки рентгеновского пучка. Показано, что изгибные адаптивные элементы могут осуществлять быструю (вплоть до микросекунд) перестройку параметров рентгеновского пучка непосредственно во время проведения экспериментов, а также не обладают гистерезисом зависимости углового отклонения от напряжения управляющего сигнала. Это выгодно отличает предложенные элементы от пьезокерамики и позволяет проводить прецизионные эксперименты без необходимости использования дополнительных систем обратной связи.

В третьей главе приведены результаты измерений ряда перспективных кристаллов в условиях внешних воздействий с помощью метода двухкристальной рентгеновской дифракометрии, реализованного как с помощью традиционного гониометрического сканирования, так и с помощью адаптивных изгибных элементов. Показано, что предложенная методика обеспечивает на несколько порядков более высокий уровень быстродействия относительно традиционного гониометрического сканирования.

В четвертой главе представлены результаты, полученные при использовании предложенной методики для управляемой перестройки области многоволнового взаимодействия рентгеновского излучения. С помощью системы стробоскопической регистрации, описание которой представлено в указанной главе, показано, что с помощью ультразвуковой модуляции можно контролируемо изменять многоволновую область, что дает

возможность проводить прецизионный анализ объемной структуры дефектов кристаллической решетки.

Пятая глава посвящена проведению экспериментов в высокоразрешающей схеме трехкристальной рентгеновской дифрактометрии. Проведены измерения кристалла кремния, подвергнутого одноосной механической нагрузке, с помощью традиционного поворота гониометра, а также с помощью адаптивного изгибного элемента, получены карты обратного пространства (КОП) исследуемого кристалла при различных значениях нагрузки. Предложены алгоритмы пересчета данных, а также показано, что полученные с помощью предложенной методики результаты обладают существенно большей точностью, чем полученные с помощью традиционного гониометрического сканирования.

Таким образом, в диссертационной работе Элиовича Я.А. реализована новая методика проведения рентгенодифракционных экспериментов с временным разрешением вплоть до микросекунд, позволяющая исследовать широкий круг кристаллических материалов в условиях различных внешних воздействий. Научная новизна работы и ее актуальность не вызывают вопросов.

Возможность модернизации различных рентгеновских приборов на основе разработанных изгибных элементов указывает на легкую масштабируемость предложенной методики.

Возможности предлагаемой методики наглядно продемонстрированы при проведении двух- и трехкристальных рентгеновских экспериментов, показано, что временное разрешение методики даже на этапе тестирования на лабораторном источнике позволяет получать новую уникальную информацию о происходящих в кристаллах структурных изменениях, многократно превосходя возможности любых имеющихся на текущий момент механических гониометрических систем.

Стоит упомянуть результаты изучения многоволновой области рентгеновской дифракции, представленные в диссертационной работе, в особенности возможность ее управляемой перестройки с помощью рентгеноакустической модуляции. Это направление является не так хорошо изученным в силу значительной технической сложности реализации соответствующих экспериментальных схем, а также необходимости проведения сложных расчетов.

Вместе с тем, работа не свободна от недостатков:

1. Представляется крайне перспективным использование разработанных автором элементов для реализации спектральной перестройки синхротронного пучка вплоть до сотен электронвольт, отмеченное в выводах. Однако, в тексте диссертации этой проблеме уделено недостаточное внимание и не приведены результаты экспериментов, которые доказывают возможность достижения таких диапазонов перестройки.
2. В рамках диссертационной работы не рассматривается проблема влияния недостатка интенсивности используемого лабораторного источника, или синхротронного пучка на предельное временное разрешение установки. Это представляется важным, если источник обеспечивает лишь конечное и небольшое число фотонов в единицу времени. В этом случае именно его интенсивность будет определять предельное временное разрешение в силу лимитированного числа фотонов на каждый канал многоканального анализатора за единицу времени.
3. Есть претензии к изложению результатов, представленных в разделе **4.3. «Численное моделирование колебаний. Полученные результаты»**. Автор не счел необходимым подробно описать, как он проводил численное моделирование акустических полей в резонаторе, изготовленном из кристалла парателлуриата, методику расчетов и анализ полученных результатов, сославшись на то, что «более подробно

информация о расчетах представлена в работе [3]», т.е. сославшись на работу, в число авторов которой он не входит.

4. На стр. 11 автор указывает, что в диссертацию включены материалы, опубликованные в 15 публикациях, но приводит список только из 5 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК. Где опубликованы остальные 10 статей остается загадкой. Далее, в тексте диссертации отсутствуют ссылки на опубликованные автором статьи, т.е. нет указания на то, какие из результатов, приведенных в выводах к основным главам работы, опубликованы в конкретных статьях автора.
5. Список использованной литературы составлен небрежно. В целом ряде приведенных публикаций, например в №№ 2-4, 14-21, 31, 43, 65, 75, 98-100, 102-105, 116, 118-121, 123, 124, 130, 132 и др., не приведены названия статей, в ряде других статей не приведен полный список авторов. Это наводит на мысль, что целый ряд ссылок взят автором из работ других авторов, в том числе и различных обзоров и лично автором не прорабатывался.
6. В тексте присутствует целый ряд неудачных выражений. К примеру, автор часто употребляет слово изучение во множественном числе (стр.49); на стр. 26 можно прочитать, что «уширение в $\sqrt{2}$ раз больше, чем кривая...»; принятое в классической литературе название закона Бугера-Ламберта-Бера сокращено только до закона Бугера (стр. 20); при этом число опечаток не превышает среднестатистического уровня для кандидатских диссертаций.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации, ее научной и практической значимости. Диссертационная работа Я.А. Элиовича написана простым и понятным языком, содержит большое количество ссылок на литературные источники по теме работы. В диссертацию включены материалы, опубликованные в 5 печатных работах в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК. Важно отметить, что

полученный в ходе выполнения работы патент на изобретение подтверждает высокую практическую значимость полученных результатов. Апробация результатов работы была проведена в более чем 30 докладах на российских и международных конференциях, а также при выполнении ряда проектов РФФИ. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Элиовича Я.А. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям и требованиям раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор, Элиович Ян Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.18 – кристаллография, физика кристаллов.

Официальный оппонент
МЕНУШЕНКОВ АЛЕКСЕЙ ПАВЛОВИЧ

7
С и

«30» июня 2020 г.

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики твёрдого тела и наносистем Института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Почтовый адрес: 115409, Каширское шоссе, д.31, г. Москва, Россия

Телефон: +7(495)788-56-99, доб. 9020

E-mail: armenushenkov@mephi.ru



Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ
А.А. Абатурова
А.А. Абатурова