

УТВЕРЖДАЮ

Врио. ректора БФУ им. И. Канта

А.А. Федоров

«~~20~~» апреля 2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

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 посвящена разработке аппаратно-методической базы для проведения экспериментов с помощью рентгеновского и синхротронного излучения с временным разрешением, а также исследованию с помощью этой базы перспективных кристаллических материалов в режиме реального времени.

Разработка новых подходов для проведения исследований с помощью рентгеновского и синхротронного излучения с временным разрешением представляется крайне перспективным направлением, т.к. фокус внимания современной науки все больше переходит от исследования статических объектов наномасштаба к исследованию динамики процессов, которые происходят в таких объектах. На первый план выходит наномасштабная диагностика динамических процессов, для проведения которой рентгеновское излучение, в силу соразмерности длины волны и межатомного расстояния, является наиболее подходящим инструментом. В настоящее время активно развивается направление «pump and probe», основная идея которого заключается в многократном исследовании с помощью мощных источников, например рентгеновского лазера на свободных электронах, одного и того же процесса с немного изменяющимися начальными условиями, что позволяет достичь временных разрешений вплоть до фемто- и аттосекунд. Однако объект при каждом акте воздействия обычно полностью разрушается.

Вторая возможность времяразрешающих исследований создается благодаря существенному развитию быстродействующей детектирующей аппаратуры для работы с рентгеновским излучением. Современные детекторы позволяют получать хорошее разрешение не только в пространстве, но и во времени, позволяя, по сути, снимать «рентгеновское кино» происходящих в исследуемых образцах изменений, регистрируя сотни кадров в секунду и обеспечивая временное разрешение вплоть до долей секунд. К сожалению, такие

детекторы не позволяют проводить долговременную регистрацию из-за перегрузки буферных систем и особенностей аппаратного обеспечения.

Однако в указанные направления исследования динамики процессов не попадает широкий круг объектов, динамика которых охватывает диапазон временных разрешений от долей секунд до долей микросекунд. Этот диапазон практически не покрывается существующей аппаратно-методической базой для проведения рентгеновских экспериментов.

В этой связи диссертация Элиовича Я.А., посвященная разработке методики и физике работы элементов адаптивной рентгеновской оптики, позволяющих осуществлять перестройку параметров исследовательского рентгеновского пучка непосредственно во время экспериментов с быстродействием вплоть до 10^{-1} – 10^{-6} с, является весьма актуальной.

Диссертация Элиовича Я.А. состоит из 128 страниц и включает в себя введение, пять глав, а также заключение и список литературы из 134 наименований.

В первой главе содержатся данные литературного обзора по тематике диссертационной работы. Представлено обоснование актуальности тематики, приведен обзор направлений для решения поставленных в рамках данной работы задач.

Во второй главе содержатся подробные сведения о ключевых элементах предлагаемой в рамках данной диссертационной работы методики – адаптивных изгибных элементах рентгеновской оптики. Приведены результаты их тестирования в различных условиях, включая лабораторные установки и синхротронные станции, получены оценки возможных диапазонов перестройки экспериментальных параметров при их использовании.

В третьей главе приведены результаты тестирования предложенной методики для изучения перспективных кристаллических материалов в условиях статических и динамических внешних нагрузок с помощью метода двухкристальной рентгеновской дифрактометрии. Показано, что предлагаемая методика обеспечивает принципиально новый уровень быстродействия и позволяет получать уникальную информацию об эволюции структурных изменений в кристаллах в условиях внешних воздействий.

В четвертой главе содержатся результаты применения предложенной методики для перестройки области многоволнового взаимодействия рентгеновского излучения. Показано, что ультразвуковая модуляция может использоваться для контролируемой и прецизионной перестройки многоволновой области, что может быть использовано для проведения экспериментов по анализу объемной структуры дефектов в кристаллах.

В пятой главе показана возможность проведения экспериментов в трехкристальной высокоразрешающей схеме рентгеновской дифракции и использованием предложенной в рамках данной работы методики. Приведены результаты измерений кристалла кремния в

условиях статической одноосной механической нагрузки, показано, что полученные результаты обладают существенно большей точностью, чем полученные с помощью традиционного гониометрического сканирования.

Таким образом, в диссертационной работе Элиовича Я.А. предложена новая методика проведения рентгенодифракционных экспериментов с теоретическим временным разрешением вплоть до единиц микросекунд, которая легко масштабируется от простейших лабораторных дифрактометров до современных синхротронных станций. В связи с этим актуальность и научная новизна данной диссертационной работы не вызывает вопросов.

Стоит отметить, что в работе приведена детальная информация о способах реализации предложенной методики, включая литературный обзор работ, которые ранее проводились в этом направлении. Приведены важные технические детали и интересная информация о модернизации оборудования. Продемонстрированы детальные результаты тестирования ключевых элементов предлагаемой методики – адаптивных изгибных элементов рентгеновской оптики.

Удачно выбрана и модельная апробация предлагаемой в рамках диссертационной работы Элиовича Я.А. методики. Приведены результаты изучения различных перспективных с точки зрения микроэлектронной промышленности кристаллов в условиях внешних воздействий, как статических, так и динамических. Исследования в условиях статических нагрузок проводились для кристалла кремния (Si), подвергнутого одноосной статической механической нагрузке. В работе приведены результаты измерений кривых дифракционного отражения (КДО) исследуемого кристалла с помощью традиционного гониометрического сканирования, а также полученные с использованием предложенной в рамках данной работы методики, причем показано, что последняя обеспечивает многократное преимущество по скорости проведения измерений, обеспечивая временное разрешение порядка 1 секунды уже на начальном этапе тестирования.

На примере изучения дефектных кристаллов фторида лития (LiF) в условиях динамической ультразвуковой нагрузки с помощью предложенной методики показано изменение кристаллической структуры в режиме реального времени с окोलосекундным временным разрешением. Результаты, приведенные в диссертационной работе, невозможно получить с помощью традиционных инструментов проведения рентгенодифракционных экспериментов. Дальнейшее проведение экспериментов в этом направлении представляется крайне интересным, т.к. предложенная методика может стать уникальным инструментом для изучения переходов от упругих деформаций в исследуемых кристаллах к неупругим необратимым изменениям, что является ключевой задачей для микроэлектроники, т.к.

поможет спрогнозировать прочностные запасы микронэлектронных компонентов, изготавливаемых из различных кристаллов.

Отдельного упоминания стоит реализация трехкристалльной схемы рентгеновской дифрактометрии с применением методики, предложенной в рамках настоящей работы. Возможности такой схемы открывают путь к исследованию сложных процессов распределения деформаций в кристаллах в условиях статических и динамических воздействий. Стоит также отметить, что полученные результаты, благодаря особенностям методики, обладают принципиально иным уровнем точности, на несколько порядков превосходя существующие на текущий момент подходы, что может быть в дальнейшем использовано в широком кругу экспериментальных методов, как в лабораторных условиях, так и при проведении экспериментов на синхротронных станциях.

Замечания:

Стоит отметить, что в диссертационной работе не определялись точные значения механической нагрузки при проведении экспериментов, описанных в 3 и 5 главах работы. Возможность прецизионного контроля прилагаемого давления позволила бы провести эксперименты вблизи начала отклонения от закона Гука, точно определять пределы упругости исследуемых кристаллов и соотносить значение нагрузки и наблюдаемые изменения при измерениях КДО или карт обратного пространства в случае проведения экспериментов в трехкристалльной схеме.

В диссертационной работе не приведены сведения или оценки минимальных размеров объектов, которые могут исследоваться с помощью предложенной методики.

К замечаниям можно также отнести опечатки в оформлении ссылок на рисунки в основном тексте диссертации, как например ссылки на рис.43а на с.109 или рис.44 на с.112, а также ряд опечаток в самом тексте работы. Например, на с.12 неверно указано количество страниц, а на с.39, 46, 49 и других содержатся незначительные опечатки в словах.

Указанные недостатки не могут повлиять на общую положительную оценку диссертации Я.А. Элиовича. Диссертационная работа содержит обширный набор ссылок на различные литературные источники, имеющие прямое отношение к теме диссертации, она написана простым и понятным языком и хорошо оформлена. В диссертацию включены материалы, опубликованные в 15 печатных работах, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, а также один патент на изобретение.

Диссертация Элиовича Я.А. представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям и требованиям раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правитель-

ства 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.

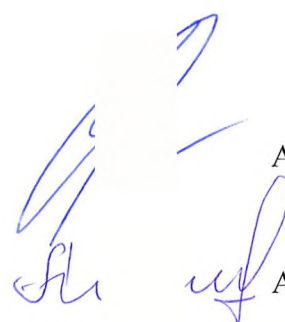
Диссертационная работа Элиовича Я.А. «Времяразрешающая рентгенодифракционная диагностика перспективных кристаллических материалов» заслушана и обсуждена на заседании Ученого совета Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, протокол № 3/20 от «19» марта 2020 года.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании Ученого совета Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, протокол № 3/20 от «19» марта 2020 года.

Отзыв составили:

Председатель ученого совета ИФМН и ИТ,
директор института, д.ф.-м.н., профессор

Ученый секретарь ученого совета ИФМН и ИТ,
к.ф.-м.н.



А.В. Юров
А.А. Шпилевой

«23» марта 2020 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
Почтовый адрес: 236016, ул. Александра Невского, д.14, г. Калининград, Россия
Телефон: +7(4012)595-595
E-mail: post@kantiana.ru
Официальный сайт: <https://kantiana.ru/>