

ОТЗЫВ

официального оппонента Ильина Александра Сергеевича на диссертационную работу **Аккуратова Валентина Ивановича** «Исследование деформационного поведения кристаллов рентгенодифракционными методами при воздействии механических нагрузок», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.20. - «кристаллография, физика кристаллов».

Диссертация Аккуратова В.И. посвящена изучению деформационного поведения кристаллов в условиях статических и динамических механических нагрузок. Для исследований эволюции деформационных изменений кристаллов были использованы методы рентгеновской дифрактометрии и топографии.

Рентгеновское излучение является удобным и универсальным инструментом для прецизионных структурных исследований. К основным достоинствам рентгенодифракционных методов можно отнести возможность неразрушающей диагностики и высокую чувствительность к нарушениям атомной структуры материалов из-за соразмерности длины волны и межатомного расстояния. Таким образом, рентгеновское и синхротронное излучение широко используется для исследований дефектной структуры кристаллических материалов.

Для исследования динамики структурных изменений кристаллов в условиях внешних воздействий, используются разнообразные рентгенодифракционные методы для быстрых измерений. Развитие этих методов для исследований с временным разрешением идет по трем направлениям. К первому направлению относится создание новых, более мощных и ярких, источников рентгеновского излучения, например, таких, как синхротроны СКИФ и СИЛА, уже строящиеся в России, или лазеры на свободных электронах. Ко второму направлению относятся разработки различных типов быстрых детекторов. К третьему направлению относятся элементы рентгеновской оптики и системы их позиционирования. В этом случае временное разрешение методик реализуется за счет управления пространственным или угловым положением пучка.

Результаты, представленные в данной диссертации, относятся к третьему направлению. В работе представлены новые, оригинальные методики для проведения быстрых и непрерывных измерений кристаллических материалов при помощи адаптивной рентгеновской оптики в условиях механических статических и динамических нагрузок. Автором развиты эффективные методы для прецизионных структурных измерений кристаллов, которые могут применяться и на лабораторных, и на синхротронных источниках рентгеновского излучения для прогнозирования надежности опто- и микроэлектронных компонентов, используемых в электронных и аналоговых устройствах. Таким образом, **актуальность** работы не вызывает сомнений.

Диссертация Аккуратова В.И. построена по традиционной схеме и состоит из введения, пяти разделов с результатами исследований, заключения, выводов и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 140 страниц, включая 51 рисунок, 5 таблиц и список литературы из 149 наименований.

Во введении сформулирована актуальность выбранной темы исследования, а также цель и задачи работы. Здесь же представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе дан общий обзор темы работы. Описаны механические свойства кристаллов, применяемые методы их изучения и механизмы упругого и пластичного деформирования. Рассмотрены методики рентгеновской дифрактометрии и топографии, используемые для структурных исследований монокристаллов при внешних воздействиях, таких как электрические поля и механические нагрузки. Представлена конструкция элементов адаптивной рентгеновской оптики на изгибной моде колебаний и дано описание их применения в рентгеновской двухкристальной и трехкристальной дифрактометрии с временным разрешением.

Во втором разделе представлено описание создания технической и методической базы для рентгеновской дифрактометрии с временным разрешением с применением адаптивной рентгеновской оптики на изгибных колебаниях. Представлена методика картирования обратного пространства кристаллов посредством одновременного сканирования двумя элементами адаптивной рентгеновской оптики. Приведены экспериментальные результаты, полученные в ходе апробации данной методики на кристалле кремния.

В третьем разделе рассмотрено применение времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии для изучения кристаллов в условиях ультразвуковых вибраций. Описана конструкция электромеханической системы для ультразвукового вибрационного воздействия на монокристаллы. Приводятся экспериментальные результаты применения времяразрешающей двухкристальной дифрактометрии на примере кристалла фторида лития и времяразрешающей трехкристальной дифрактометрии на примере кварцевого резонатора.

В четвертом разделе описано применение методик времяразрешающей рентгеновской дифрактометрии для изучения кристаллов в условиях одноосного сжатия. Приведены характеристики пресса, используемого для одноосного сжатия монокристаллов. Демонстрируются результаты применения новых методик: двухкристальной дифрактометрии на примере кристаллов кварца и парателлурита и трехкристальной дифрактометрии на примере кристалла фторида лития.

В пятом разделе представлено исследование локальной динамики деформации кристаллов триглицинсульфата под воздействием квазистатического одноосного сжатия до 3,5 МПа с использованием двухкристальной дифрактометрии и топографии.

В конце каждого раздела диссертации сформулированы краткие выводы, что улучшает восприятие материала работы. Общие выводы приведены в конце диссертации, и в полной мере отражают научные результаты.

Среди наиболее **важных результатов**, представленных в работе, можно выделить следующие:

Диссертантом предложены и апробированы новые, оригинальные методики рентгеновской двухкристальной и трехкристальной дифрактометрии и топографии для *in situ* исследований свойств и структуры кристаллов. Для реализации данных методик диссертантом был разработан аппаратно-программный комплекс на базе трехкристального дифрактометра, включая изготовление систем для одноосного сжатия и ультразвуковой вибрационной нагрузки образцов. Предложенные методики позволяют с временным и пространственным разрешением получать информацию о перестройке структуры и обладают высоким потенциалом для применения как на лабораторных, так и на синхротронных источниках рентгеновского излучения. Наиболее интересным методическим результатом является оригинальная методика сканирования обратного пространства кристаллов, основанная на применении двух изгибных пьезоактуаторов, что позволило полностью отказаться от механических гониометрических систем, для ускорения измерений и повышения их точности.

Проведено исследование динамики и анизотропии структурных изменений в кристаллах триглицинсульфата в условиях одноосного механического сжатия. В ходе исследований было выявлено «механическое» двойникование кристалла триглицинсульфата в условиях одноосного сжатия вдоль кристаллографического направления [100], которое может быть вызвано перестройкой сегнетоэлектрической доменной структуры кристалла при деформации пьезоактивного кристаллографического направления.

При помощи предложенной в работе методики трехкристальной дифрактометрии были измерены упругие деформации растяжения-сжатия кварцевого резонатора в условиях ультразвуковых колебаний и установлено изменение параметра решетки в зависимости от величины прикладываемой нагрузки.

Все результаты диссертационной работы получены при непосредственном участии ее автора. Экспериментальные исследования выполнялись с применением хорошо

апробированных и обладающих высокой степенью **достоверности** методов рентгеновской дифрактометрии и топографии. Полученные результаты и научные выводы основываются на взаимодополняющих экспериментальных данных. Текст **автореферата** достаточно полно отражает содержание диссертации.

Практическая значимость состоит в разработке аппаратно-методического комплекса для бесконтактного и неразрушающего контроля распределения объемных деформаций, который может быть использован как для исследований свойств кристаллов в условиях нагрузок, так и для решения прикладных задач прогнозирования надежности микроэлектронных кристаллических компонентов, используемых в современных устройствах.

К диссертации имеется ряд замечаний:

1. При анализе результатов рентгеновской дифрактометрии и топографии кристаллов триглицинсульфата, подвергнутых одноосному сжатию, упоминается, что при увеличении нагрузки наблюдался рост интегральной интенсивности дифрагированного излучения, связанный с деформацией структуры. При исследовании других кристаллов в условиях одноосного сжатия, например, кварца или парателлурита, этот эффект также должен был наблюдаться, но в тексте диссертации этому не уделено внимания.

2. Для автоматизации использованного в работе дифрактометра было выбрано открытое программное обеспечение TANGO, однако этот выбор не был обоснован в сравнении с аналогичными платформами для управления большим количеством научных приборов, например, такими как Labview.

3. Часть пятого раздела диссертации посвящена рентгенотопографическим исследованиям сегнетоэлектрических кристаллов триглицинсульфата в условиях воздействия электрического поля. Неясно, почему описанные в этом разделе результаты о формировании строго локализованных областей деформаций никак не фигурируют в выводах и заключении диссертационной работы и автореферата.

4. В тексте диссертационной работы присутствует ряд опечаток. Например, к ним можно отнести использование знака дефиса вместо знака «минус» в нотациях рентгенооптических схем (стр. 54, 91). В некоторых местах автор путает шрифты для обозначения векторов и физических величин. Также, иногда в диссертации встречаются крайне длинные, сложные для понимания предложения (например, стр. 34). Присутствуют и пунктуационные ошибки, например, пропущенные запятые (стр. 56, 87).

Сделанные замечания не портят положительного впечатления о диссертационной работе Аккуратова В.И. Работа является логически завершенным научным исследованием,

в результате которого получен ряд результатов, представляющих фундаментальный и практический интерес. Представленные в диссертации научные результаты были представлены в 32 работах: в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами (РИНЦ, Scopus, Web of Science), и в 26 докладах на национальных и международных научных конференциях. Диссертация обладает достаточным объемом, содержит обширный набор ссылок, написана понятным языком и хорошо оформлена.

Диссертационная работа Аккуратова В.И. полностью удовлетворяет всем требованиям, установленным разделом II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.20. – «кристаллография, физика кристаллов», а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических
наук (01.04.10 физика полупроводников)
доцент кафедры общей физики
и молекулярной электроники физического факультета МГУ

Ильин Александр Сергеевич

« 31 » октября 2023

Информация о месте работы оппонента:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»
Доцент кафедры общей физики и молекулярной электроники физического факультета
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, с.2.

Электронная почта: as.ilin@physics.msu.ru

Телефон: 84999393922

Согласен на обработку персональных данных.

И.о. декана



В.В. Белокуров