ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Благова Александра Евгеньевича «Развитие методов рентгеновской дифракционной диагностики конденсированных сред в условиях динамических воздействий», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Дифракция рентгеновских лучей является основой для эффективного решения задач, связанных с изучением внешних воздействий на кристаллы, например, задач физической акустики, таких как исследование процессов распространения и взаимодействия упругих волн в твёрдых телах, а также определение параметров реальной структуры деформированных кристаллов. Результаты изучения взаимодействия рентгеновского излучения с конденсированными средами в условиях динамических воздействия имеют ряд актуальных приложений связанных с возможностью контролируемо воздействовать на дифрагированный рентгеновский пучок и оперативно управлять его параметрами. Модуляцию кристалла ультразвуковыми колебаниями можно использовать также для реализации перестраиваемых элементов рентгенооптической схемы, немеханической природы. В последнее время на этой основе разрабатываются методы модуляции, фокусировки, отклонения и сканирования рентгеновских пучков. Использование указанных методов позволит наблюдать за структурными изменениями материалов при различных видах внешних воздействий, изучать динамику и кинетику быстропротекающих процессов и непосредственно наблюдать отдельные фазы и стадии изменения дефектной структуры, формирования и разрушения твердого тела.

Принимая во внимание вышесказанное, тема диссертационной работы Благова А.Е. «Развитие методов рентгеновской дифракционной диагностики конденсированных сред в условиях динамических воздействий» представляется весьма актуальной.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, изложенных на 417 страницах, включает 232 рисунка, 15 таблиц и список литературы из 389 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы. Определена область исследования и сформулированы основные положения диссертации: актуальность, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава представляет обзор экспериментальных и теоретических работ в областях развития методов диагностики кристаллов с помощью рентгеновской дифракции в условиях динамических воздействий, исследования влияния электрического поля на кристаллы, а также практического применения этих рентгеновских методов для изучения неоднородностей и дефектов кристаллов.

Вторая глава посвящена описанию методов и исследовательской аппаратуры, применяемых для рентгеновской структурной диагностики кристаллов в условиях статических и динамических воздействий. На базе дифрактометров ТРС и Smartlab а также акустического и контрольно-измерительного оборудования был создан аппаратурно-методический комплекс по реализации рентгенодифракционных экспериментов при внешних воздействия. Разработаны методики создания рентгеноакустических резонаторов и образцов для исследования воздействия электрического поля. Созданы программы и алгоритмы расчета трехмерного распределения поля упругих деформаций в рентгеноакустических резонаторах различного типа, получено экспериментальное подтверждение достоверности указанных методов с использованием рентгеновской дифракции для визуализации поля упругой волны. На основе динамической теории дифракции с применением метода «траекторий» для решения уравнений Такаги в случае градиентной деформации были разработаны алгоритмы и программы для моделирования и анализа экспериментальных кривых, измеряемых интегрально или с разрешением по

времени в условиях постоянной или градиентной деформации по рентгеновскому пучку.

В третьей главе описаны методы «немеханического» отклонения рентгеновского пучка и результаты, полученные при их использовании. На основе обнаруженных рентгеноакустических эффектов предложен и реализован метод немеханического отклонения рентгеновского пучка и методы быстрого измерения кривых дифракционного отражения с помощью ультразвуковой модуляции параметра решетки одного из элементов рентгенооптической схемы. Метод позволяет проводить прецизионные измерения с высоким разрешением по времени без использования сложных механических систем. Создан прибор нового класса – рентгеноакустический дифрактометр для измерения кривых дифракционного отражения от динамических объектов, изучения динамики дефектной структуры кристаллических материалов и исследования поведения различных кристаллов при высоких деформационных нагрузках. С применением разработанных методов и рентгеновской аппаратуры проведено изучение деформационных процессов в кристаллах Si, Ge, LiF, TeO_2, SiO_2 при вибрационных нагрузках большой амплитуды и продемонстрированы новые возможности исследования динамики структуры кристаллических объектов в условиях вибрационных деформационных нагрузок.

Четвертая глава состоит из двух разделов: первый посвящен разработке методов быстрого управления длинной волны рентгеновского пучка, а второй – управлению сходимостью рентгеновского пучка. Реализован метод быстрой перестройки длины волны рентгеновского пучка на основе ультразвуковой модуляции параметра кристаллической решетки. Экспериментально протестированы две рентгенооптические схемы по перестройке рентгенооптической схемы, позволяющие быстро изменять энергию дифрагированного рентгеновского пучка в эксперименте и проводить исследования с применением методов рентгеновской спектроскопии с разрешением по времени.

Реализованы методы управления структурой рентгеновского пучка - расходимостью и фокусировкой на основе градиентной ультразвуковой деформации кристаллической решетки. Предложены амплитудный и частотный способы управления величиной градиента кристаллической решетки. Экспериментально изучены возможности предложенных способов управления градиентом деформации и показана их эффективность для управления структурой рентгеновского пучка. Реализована фокусировка расходящегося пучка с применением амплитудного способа управления градиентом деформации.

В пятой главе представлены результаты исследования кристаллов с применением двух- и трехкристальной двухволновой дифрактометрии, а также многоволновой дифракции, в том числе в условиях возбуждения кристаллов ультразвуком. Экспериментально и теоретически исследованы особенности многоволновой дифракции в схеме высокого разрешения. Разработаны методики расчета и поиска рефлексов для случая компланарной многоволновой дифракции. Разработаны методы по исследованию дефектной структуры кристаллических объектов с применением многоволновой и квази-многоволновой дифракции в комплексе с двухволновыми двух- и трехкристальными методами. Показана более высокая чувствительность к дефектам многоволновой дифракции по сравнению с двухволновой. Проведены исследования многоволновой дифракции в условия акустического воздействия на кристаллическую решетку. Разработаны методы подстройки условий многоволновой дифракции на основе рентгеноакустических взаимодействий.

В шестой главе исследовано влияние электрического поля на кристаллическую и дефектную структуру кристаллов парателлурита и лангатата. Разработаны методы исследования кристаллов при внешних воздействиях с применением высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и многоволновой рентгеновской дифракции. С помощью указанных методов на примере кристаллов парателлурита и лангатата исследовано поведение кристаллической решетки и реальной (дефектной)

структуры при воздействии на пьезоэлектрические кристаллы электрического поля, приложенного в пьезоактивном направлении. Проведены локальные измерения деформации параметра кристаллической решетки при приложении электрического поля до $4*10^6$В/м. Исследовано изменение активной компоненты пьезоэлектрического тензора в кристалле лангатата. Обнаружено и исследовано необычное поведение кристаллической структуры парателлурита при воздействии электрического поля с характерным образованием доменов неферроидного типа.

В целом диссертационная работа выполнена на высоком экспериментальном уровне. Вместе с тем по диссертации можно сделать ряд замечаний, которые можно разбить на две группы.

Формальные замечания:

1. Текст изобилует большим количеством орфографических и стилистических ошибок от его начала («один из параметров рентгеновского пучка, какой как…», стр. 9) до конца («методика расчета пар … заключается в расчете угла …», стр. 270), что, конечно, раздражает читателя.

2. Названия большинства разделов работы (см. «Оглавление») состоят из нескольких предложений (пунктов), что затрудняет ориентацию читателя в тексте.

3. В подписях ко многим рисункам с экспериментальными данными отсутствуют названия соответствующих материалов образцов и/или дифракционных отражений (рис. 3.6, …, рис. 6.29), затрудняя чтение.

4. В подписях к «чужим» рисункам в разделе 1 нет ссылок на соответствующие цитируемые работы.

5. Почти во всех схемах рентгеновской дифракции, коих много в работе (рис. 3.1, …, рис. 4.5), ширина падающего на кристалл рентгеновского пучка больше ширины отраженного (или прошедшего), что неправильно с учетом дисперсии излучения.

Замечания по существу:

6. В разделе 2.2 описан формализм для аккуратного расчета кривых дифракционного отражения в геометрии Брэгга на основе приближенной формулы (2.1), который сводит проблему расчета двойного интеграла к представлению однократного интеграла с аппаратной функцией, с заданной точностью описывает кривую отражения в узком угловом интервале и успешно используется для анализа экспериментальных данных [311]. Автор по непонятным причинам решил еще «упростить» задачу, приведя формулу 2.4, которая все равно содержит интеграл, но в ней реальное спектральное распределение заменено двумя значениями длин волн, что привело к вполне естественной потере точности расчетов по сравнению с [311] (см. рис. 2.7).

7. Более того, наряду с этим формализмом в том же разделе подробно описан подход для аккуратного расчета кривых отражения в геометрии Лауэ, тогда как в следующих главах оба подхода были «забыты», и для анализа экспериментальных данных используются довольно грубые приближения лоренцевой или гауссовой форм кривых отражения (рис. 3.20, …, стр. 298).

8. В разделе 3.2 описаны две альтернативные двухкристальные схемы дифракции на основе рентгено-акустического кристалла-резонатора, «образец-анализатор» и «монохроматор-образец», которые были использованы в описанных далее экспериментах, но нигде не проводилось сравнение преимуществ той или иной схемы (или их эквивалентности).

9. В разделе 4.1 автор описывает преимущества однокристальной схемы дифракции с использованием щелевого коллиматора, но нигде не указаны значения ключевого параметра этой схемы, угловой расходимости, которая для реализации схематически описанных преимуществ должна быть сравнима с шириной пика второго кристалла (а это всего несколько угловых секунд).

10. В работе фактически не рассматривается проблема учета дисперсии в анализе соответствующих кривых отражения (рис. 3.22,…, 6.19-22), а автор повсеместно ограничивается словами, что измерения сделаны в «практически бездисперсионной схеме». Исключение составляет только случай многоволновой дифракции (раздел 5.1), где элементы такого учета

присутствуют, поскольку именно они определяют форму кривой отражения «слабого рефлекса». Однако, и в этом случае подход автора, схематически показанный на рис. 5.8, является крайне неточным, поскольку диаграмму Дю-Монда на этом рисунке надо дополнить еще одной осью в перпендикулярном к плоскости отражения направлении и соответствующими не «параллельными» (как в бездисперсионной схеме) областями отражения вдоль этой оси.

11. Трактовка довольно сложных по форме кривых отражения, показанных на рис. 6.19, на языке («полу»)ширины «пиков» (рис. 6.20) выглядит по крайней мере несерьезной.

Отмеченные недостатки не сильно снижают уровень представленной диссертационной работы и не затрагивают основные выводы работы, а также не являются принципиальными для её общей положительной оценки.

Автором получены новые важные научные результаты:

- разработаны и успешно апробированы алгоритмы расчета и визуализации объемного поля смещений в кристаллах условиях возбуждения ультразвуковых колебаний, показавшие хорошее соответствие эксперименту;
- разработаны методы быстрого управления угловым положением рентгеновского пучка в эксперименте;
- разработаны методы рентгеноакустической спектроскопии с разрешением по времени, перспективные для рентгеноспектрального анализа с высоким быстродействием;
- развиты методы изучения дефектной структуры кристаллов низших и средних сингоний с применением многоволновой и трехкристальной дифракции, в том числе, в условиях внешнего воздействия ультразвуком и электрическим полем;
- обнаружено образование необычных доменов, отличных от ферроэлектрических доменов, при воздействии на пьезоэлектрический кристалл TeO_2 электрического поля.

Полученные автором диссертации результаты апробированы на 85 всероссийских и международных конференциях (в том числе 10 приглашенных докладов). Основные результаты исследований изложены в 105 публикациях (в том числе в 19-и статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых WoS).

Результаты диссертации в целом изложены четко и ясно, рисунки и графики в полной мере отражают эти результаты. Выводы и защищаемые положения сформулированы четко и правильно. Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание работы.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение, что по объему, актуальности и практической значимости представленная работа отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации и установленным постановлением правительства российской федерации от 24 сентября 2013 г. n 842 «о порядке присуждения ученых степеней», а её автор, Благов Александр Евгеньевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Заведующий «Лабораторией физики
поверхности микроэлектронных структур»
ФГБУН Физико-технологического
института РАН (ФТИАН РАН),
доктор физ.-мат. наук Михаил Александрович Чуев

Ученый секретарь
ФГБУН Физико-технологического
института РАН,
кандидат технических наук В. А. Кальнов

e-mail chuev@ftian.ru
117218, г.Москва, Нахимовский проспект, 36/1, ФТИАН РАН
Тел: 8(499)129-68-10