Приложение № 6 к Соглашению от
"12" октября 2021 г. № 15.СИН.21.0019

ОТЧЕТ О РЕАЛИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ (ПРОЕКТА)
по итогам отчетного периода
отчетный период:

с 01.01.2023 по 31.12.2023

1. Наименование Получателя гранта: Федеральное государственное учреждение "Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника" Российской академии наук"

2. Соглашение о предоставлении гранта в форме субсидии: №075-15-2021-1362 от "12" октября 2021 г.

3. Тема исследовательской программы (проекта): Разработка элементов и систем экспериментальных станций источников синхротронного излучения для комплементарных in situ исследований динамики трансформации объектов в условиях внешних воздействий в целях разработки, создания и диагностики новых материалов

4. Направления реализации Федеральной научно-технической программы:
Развитие ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в области ядерной медицины

5. Финансовое обеспечение реализации исследовательской программы (проекта)

Средства федерального бюджета, тыс. руб.		Средства внебюджетных источников, тыс. руб.		Всего, тыс. руб.	
план	факт	план	факт	план	факт
134700	134506.301	14200	15142.503	148900	149648.804

6. Достигнутые значения показателей, необходимых для достижения результата предоставления гранта, а также значений иных показателей

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значения на отчетный период	
			запланировано	достигнуто
Индикаторы				

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Значения на отчетный период	
			запланировано	достигнуто
1	Количество заявок на получение патентов на изобретения в области синхротронных и нейтронных исследований (разработок), не менее	Единиц	5	8
2	Количество лиц, прошедших обучение по дисциплинам (модулям), входящим в образовательные программы, разработанные в рамках реализации исследовательской программы (проекта), не менее	Человек	105	163
3	Количество проведенных научных конференций и школ в области синхротронных и нейтронных исследований (разработок) для обучающихся и исследователей по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет, не менее	Единиц	3	3
4	Количество публикаций в области синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в журналах, индексированных в международных базах данных, не менее	Единиц	20	23
5	Количество разработанных или адаптированных ускорительных и реакторных технологий, технических решений, не менее	Единиц	3	5
6	Количество созданных и осуществляющих деятельность на базе получателей гранта лабораторий и центров, включая центры коллективного пользования, не менее	Единиц	0	0
7	Размер средств из внебюджетных источников, направленных на реализацию исследовательской программы (проекта), не менее	Процентов	10	11.26

7. Расходы на выполнение исследовательской программы (проекта), источником финансового обеспечения которых является грант

№ п/п	Наименование расходов	Фактические расходы за отчетный период (тыс. руб.)
1	оплата труда, в том числе начисления на выплаты по оплате труда и иные выплаты работникам (персоналу), включая социальные выплаты, для реализации исследовательской программы (проекта)	42667.9
2	расходы на приобретение оборудования, материалов и комплектующих для оборудования, иных нефинансовых активов, в том числе основных средств, нематериальных активов и материальных запасов, необходимых для реализации гранта	39078.2
3	оплата командировок членов научного коллектива, реализующего исследовательскую программу (проект)	553.4
4	оплата научных стажировок молодых исследователей до 39 лет в организациях, на базе которых реализуется исследовательская программа (проект)	0
5	оплата участия членов научного коллектива лаборатории по направлению исследовательской программы (проекта) в конференциях, научных семинарах, симпозиумах	30
6	расходы, связанные с опубликованием научных статей и изданием монографий членов научного коллектива по направлению исследовательской программы (проекта)	344.3
7	оплата договоров на выполнение сторонними организациями работ, непосредственно связанных с осуществлением исследовательской программы (проекта), включая расходы на оплату научных исследований и работ, осуществляемых соисполнителями, указанными в исследовательской программе (проекте)	48290
8	оплата текущего ремонта лабораторий, а также прочие расходы, непосредственно связанные с осуществлением исследовательской программы (проекта)	3542.5
9	оплата работ, услуг, в том числе услуг связи, транспортных услуг, коммунальных и эксплуатационных услуг, арендной платы за пользование имуществом (за исключением земельных участков и других обособленных природных объектов), оплата работ и услуг по содержанию имущества и прочих расходов, соответствующих целям предоставления гранта	0
10	оплата подготовки, профессиональной переподготовки и повышения квалификации членов научного коллектива лаборатории по направлению исследовательской программы (проекта)	0
11	оплата организации ежегодной научной конференции и школ для исследователей в возрасте до 39 лет по направлению исследовательской программы (проекта)	0

Всего:	134506.3
в том числе сумма расходов по пп. 1-9	134506.3
Доля расходов по пп. 1-9 от размера полученного гранта, %	99.8562

8. Итоги реализации исследовательской программы (проекта) за отчетный период

8.1. Перечень использованных источников синхротронного и нейтронного излучения

КИСИ- Курчатов, PETRA-III

8.2. Достигнутые результаты исследовательской программы (проекта) и оценка их востребованности

В соответствии с Планом- графиком работ, выполняемых в рамках реализации исследовательской программы (проекта) по теме «Разработка элементов и систем экспериментальных станций источников синхротронного излучения для комплементарных in situ исследований динамики трансформации объектов в условиях внешних воздействий в целях разработки, создания и диагностики новых материалов», результаты этапа 3 проекта достигнуты в полной мере.

Ожидаемые результаты Проекта можно разделить по нескольким основным направлениям:

· Создание новой исследовательской инфраструктуры – систем окружения образца, аппаратных блоков, элементов рентгеновской оптики и рентгенооптических устройств на их основе для реализации и апробации комплекса разрабатываемых методик и оснащения новых проектируемых экспериментальных станций СИ, реализующих комплексный подход к исследованиям новых материалов, на установках класса мегасайенс (источника «КИСИ-Курчатов» и проектируемой мега-установки «СИЛА»). Создаваемая инфраструктура будет включать в себя научно-исследовательский, научно-образовательный стенд на базе современного оборудования – для разработки, апробации и тестирования исследовательских методик, инструментария и систем автоматизации в целях повышения уровня компетенций (подготовки кадров) и адаптации методик для реализации синхротронных исследований;

· Разработка новых методов диагностики кристаллических материалов с направленными свойствами поможет обеспечить понимание процессов формирования кристаллических структур и обеспечит более полное удовлетворение потребностей потребителей кристаллов с направленными свойствами. В частности, с направленными свойствами как оптических фильтров и нелинейных свойств, температурной стабильностью и стабильностью к воздействию окружающей среды;

· Создание уникальной научно-методической базы – разработка набора методик на основе рентгеновских, синхротронных и ряда комплементарных методов (электрофизических, оптических, акустических и других), принципиальная особенность которого состоит в одновременной регистрации данных, характеризующих целый комплекс свойств различной природы, в сочетании с широкими возможностями комбинирования внешних воздействий на материал в режимах реального времени, in situ и других. Комплекс методик ориентирован на диагностику структуры, динамики и установление взаимосвязи «структура-свойства» новых функциональных материалов;

· Развитие принципиально нового научно-методического подхода к разработке материалов на основе атомно-молекулярной организации органических и неорганических веществ в предкристаллизационной фазе – в условиях формирования на начальной стадии построения материала кластеров-прекурсоров, 3D-фрагментов будущей структуры. Разработка на данной основе научно-обоснованных методов поиска условий внутренней и межкомпонентной организации кластеров предкристаллизационной фазы в слабоупорядоченные и кристаллические системы;

· Разработка научно-образовательных программ подготовки кадров в области синхротронных методов и экспериментальных исследований на базе создаваемого комплекса методик и исследовательской инфраструктуры. Подготовка нового поколения специалистов в научной парадигме разрабатываемого комплексного подхода на основе рентгеновских и синхротронных методов и комплементарных междисциплинарных методик, нацеленного на развитие технологий атомно-молекулярного конструирования для разработки и создания новых функциональных материалов.

В соответствии с Ожидаемыми результатами исследовательской программы (проекта) на этапе 3 были выполнены следующие работы и получены нижеприведенные результаты.

1. В рамках работ по созданию **прототипов узлов и систем экспериментальных станций** существующих и создаваемых источников синхротронного излучения для постановки и апробации методики **«исследование структуры материалов под внешним воздействием»**, реализации исследований, подготовки кадров и оснащения экспериментальной станции СИ были получены следующие результаты.

С использованием результатов, полученных на этапе 2 реализации Исследовательской программы, была разработана комплексная рентгенодифракционная методика анализа эволюции дефектной структуры и магнитных свойств перспективных кристаллических материалов в условиях воздействия слабых (μB□□kT) внешних импульсных магнитных полей.

Целью предложенной методики является измерение интенсивности дифракционного отражения при приложении к исследуемому кристаллу внешнего импульсного магнитного поля различной напряженности, т.е. в условиях различных конфигураций распределения магнитострикционной деформации по исследуемому образцу, обусловленных процессами намагничивания (разворота векторов намагниченности в доменах, смещением доменных стенок) под внешним воздействием магнитным полем, создаваемым электромагнитными катушками. На примере монокристалла $FeBO_3$, который является антиферромагнетиком со слабым ферромагнетизмом, методика успешно прошла апробацию на станции рентгеновской кристаллографии и физического материаловедения (РКФМ) Курчатовского источника синхротронного излучения (СИ) «КИСИ-Курчатов», НИЦ «Курчатовский институт».
Разработана программа и методика лабораторных испытаний макета модуля окружения образца для реализации in situ рентгенодифракционных исследований в условиях постоянного, переменного и импульсного воздействий внешнего электрического поля, синхронизированного с системой детектирования рентгеновского излучения и системой генерации, контроля и регистрации электрических сигналов. Разработанный и изготовленный макет модуля окружения образца предназначен для проведения in situ рентгенодифракционных исследований деформационного поведения полупроводниковых и диэлектрических монокристаллических образцов в условиях постоянного, переменного и импульсного воздействия внешнего электрического поля, в том числе с временным разрешением. Макет позволяет регистрировать динамику кривой дифракционного отражения, по изменению параметров которой идентифицируются ответственные за это физические процессы, а с помощью аппроксимации и численного анализа определяются значения их характерных параметров (величина и время формирования деформаций, концентрация носителей заряда ионно-вакансионного типа и т.д.). С использованием образцов монокристалла ниобата лития $LiNbO_3$, отожженных в вакууме при температурах 500°C и 800°C, а также $LiNbO_3$ с примесью железа (масс. доля Fe 0,05%) макет модуля окружения образца успешно прошел лабораторные испытания в соответствии с разработанной программой.
Был разработан и изготовлен макет модуля окружения образца на основе системы позиционирования с оптически и рентгенопрозрачным защитным кожухом для реализации in-situ и in-operando экспериментов в условиях комбинированного воздействия внешнего электрического поля и лазерного излучения. Макет модуля окружения образца предназначен для проведения исследований деформационного поведения кристаллов без центра симметрии, демонстрирующих фотовольтаические свойства, а также обладающих ионной и вакансионной проводимостью. Исследования осуществляются с помощью методов рентгеновской дифрактометрии в геометрии на отражение и на просвет (Брэгга и Лауэ соответственно), в том числе с пространственным и временным разрешением. Конструкция макета включает набор взаимозаменяемых модулей для реализации различных рентгенодифракционных экспериментальных схем. Модули позиционирования образца позволяют реализовывать удаленное управление позицией образца относительно рентгеновского пучка, что необходимо при проведении исследований на высокоинтенсивных источниках рентгеновского излучения (синхротроны, рентгеновские лазеры на свободных электронах). С помощью настоящего макета осуществляется регистрация динамики изменения основных параметров кривой дифракционного отражения, по которой возможно определить физические процессы, возникающие в результате внешнего воздействия, а также их основные характеристики (амплитуды, времена формирования).
Организация органических молекул в упорядоченные тонкоплёночные структуры вызывает повышенный интерес исследователей во всем мире, например, в области создания биосенсорных и фотовольтаичесикх устройств. Для выявления механизмов самоорганизации молекул в условиях кристаллизации необходимо предварительное проведение исследования олигомерного состава кристаллизационного раствора и исследование влияния физических и химических параметров, влияющих на образование олигомеров. Контролируя физико-химические параметры, можно управлять олигомерным составом раствора и, соответственно, структурой получаемой из него пленки.
На примере лизоцима исследована связь между концентрацией кластера- прекурсора и особенностями образования твердой фазы. Для этого были проведены две серии работ. Методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР) была измерена олигомерная структура лизоцима (соотношение между концентрацией мономеров, димеров и октамеров) в ~60 растворах лизоцима с различным составом осадителя. В этих же растворах изучен переход к твердой фазе (кристаллизацию проводили методом диффузии в парах в варианте сидячей капли).
Как было показано для белковых пленок, перспективным является использование кристаллизационных растворов, в которых молекулы белка пребывают не в виде отдельных частиц (мономеров), а образуют предкристаллизационные кластеры – прекурсоры в виде структурированных олигомеров.
Была разработана методика получения органических пленок из кристаллизационных белковых/полимерных растворов с контролем структуры на каждом этапе их формирования. Для получение упорядоченных белковых пленок необходима комплексная методика, позволяющая контролировать структуру пленки на каждом этапе ее формирования. Данную задачу можно решить путем комбинации методов формирования тонкопленочных образцов с комплементарными методами анализа структуры – МУРР и рентгеновской рефлектометрии (РР). Данная комплексная методика позволяет сначала создать необходимый белковый раствор, проверив его структуру на наличие олигомеров, из которых будет формироваться пленка, далее из подготовленного раствора сформировать органическую белковую пленку и в конце проконтролировать структуру получившейся пленки.
Проведены синхротронные исследования структуры тонких органических пленок методом РР на источнике СИ «КИСИ-Курчатов». В результате проделанной работы для получения пленок были определены оптимальные условия их формирования и кристаллизации куриного белка лизоцима на твердых подложках, а также материал подложки. Оптимальными концентрациями Lys(мг/мл):NaCl(мг/мл) – 30:25 и 40:25. А также был выбран оптимальный материал подложки – предметное стекло. Также для полученных образцов было определено оптимальное время сушки раствора пленки. Данное время составило приблизительно 2 часа. Показано, что толщина пленок 2,5 – 2,9 нм, полученных «ножевым» методом, превышает теоретический размер мономера белка лизоцима. Электронная плотность пленок находится в пределах теоретического значения средней электронной плотности мономера белка.
Одним из эффективных и востребованных рентгеновских (синхротронных) методов структурных исследований белковых растворов является метод МУРР. Для оснащения синхротронных станций МУРР, работающих в диапазоне энергий 5 – 20 кэВ необходимы щели с малым паразитным рассеянием. По результатам проведённой ранее разработки макета коллимационных щелей для высокоразрешающего метода МУРР и микротомографии на этапе 3 проекта был изготовлен и испытан экспериментальный образец коллимационных щелей.

Измерения интенсивности рентгеновского пучка, проведённые на автоматическом малоугловом рентгеновском дифрактометре "АМУР-К", показали, что кристаллические щели рассеивают меньше, чем вольфрамовые аналоги и коллиматор Кратки.
В целях проведения испытаний экспериментального образца коллимационной щели для высокоразрешающего метода МУРР и микротомографии был разработан и изготовлен макет испытательного стенда, включающий микрофокусный рентгеновский источник, графитовый монохроматор и двумерный детектор. Испытания проводили разработанной Программе и методике испытаний макета. Целью испытаний было исследование технических характеристик объекта испытаний и выбор оптимальных параметров конструкции путем визуального контроля контура интенсивности рентгеновского излучения в области первичного пучка при использовании двух блоков шторок коллимирующих щелей с наконечниками из монокристаллического кремния и определение отношения расстояния интенсивности профиля рентгеновского пучка на уровне 10^{-3} от точки максимума к ожидаемому расстоянию, рассчитанному из геометрии оптической схемы.
В ходе реализации исследовательской программы разрабатываются эллиптические концентраторы и зонные пластинки (ЗП) Френеля на основе аморфных материалов для фокусировки излучения и получения увеличенных рентгеновских изображений: фокусное расстояние на энергии 8 кэВ – 1 м; зонная пластинка должна содержать около 60 зон при радиусе 120 мм, размер нулевой зоны должен составлять 11 мкм, размер последней зоны – не более 1 мкм.
На этапе 2 были изготовлены макеты эллиптических концентраторов, ЗП Френеля из аморфных материалов и оснастка для изготовления ЗП Френеля.
В продолжение работ, на этапе 3:
- разработаны и изготовлены экспериментальные образцы эллиптических концентраторов;
- разработаны и изготовлены экспериментальные образцы ЗП Френеля из аморфных материалов;
- разработаны и изготовлены экспериментальные образцы рентгеновского волновода из аморфных материалов.

В рамках выполнения работ 3 этапа проекта получены следующие новые результаты в области разработки детекторных материалов и структур на их основе.
Разрабатываются методики и технологии выращивания детекторных сцинтилляционных материалов на основе смешанных кристаллов Ln1(3)Al(5)O(12):Ln2^3+ (где Ln1 = Y, Lu или их комбинация, а Ln2 = Ce), CdWO4, кристаллов п-терфенила, стильбена, различных структур ZnO:
1) Получены экспериментальные образцы кристаллов вольфрамата кадмия диаметром до 52 мм для сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений синхротронных источников; разработана программа и методика исследовательских испытаний; проведены исследовательские испытания сцинтилляционных свойств экспериментальных образцов вольфрамата кадмия в условиях фото- и рентгенолюминесценции;
2) В результате проведенных работ были исследованы способы получения новых сцинтилляционных образцов из органических кристаллов п-терфенила и стильбена. Разработана технологическая инструкция роста из раствора крупных монокристаллических сцинтилляторов на основе стильбена размерами от 20 мм. Разработана методика роста тонких монокристаллических пленок п-терфенила. Выращены экспериментальные образцы монокристаллических пленок п-терфенила и кристаллов стильбена. Исследованы их сцинтилляционные свойства.
Была проделана работа по определению оптимальных условий роста для получения качественных монокристаллических образцов исследуемых веществ.
Для п-терфенила была определена растворимость в толуоле при комнатной температуре C_0 = 8 г/л. Для получения монокристаллических пленок п-терфенила из раствора были использованы два метода роста: метод медленного испарения и метод «растворитель-осадитель». В качестве растворителей использовали толуол (ОСЧ), в качестве осадителя использовали изопропанол (ОСЧ) и трижды дистиллированную воду. Кристаллические образцы, полученные методом «растворитель-осадитель», по сравнению с образцами, выращенными методом медленного испарения, и имеют лучшее морфологическое качество поверхности граней. Для образцов п-терфенила были измерены спектры излучения и пропускания, кинетики и световыход. Был определен край поглощения. Излучение образцов п-терфенила имеет сложный спектр, состоящий как минимум из 4х полос в диапазоне 340 – 470 нм. Световыход кристаллических образцов п-терфенила17000 фот/МэВ.
Для стильбена была определена растворимость в толуоле и анизоле в диапазоне температур 20 – 60 °С. Объемные кристаллы стильбена выращивали методом снижения температуры в низкотемпературных растворах. Для этого была проведена работа по подбору инертных и устойчивых к воздействию органических материалов узлов кристаллизационной установки, которые находятся в контакте с органическими растворителям во время роста. Для выращивания крупных (от 20 мм) кристаллов стильбена были определены оптимальные условия роста – температурный диапазон кристаллизации и гидродинамический режим. Для образцов кристаллов стильбена были измерены спектры излучения и пропускания, кинетики и световыход. Образцы кристаллов транс-стильбена обладают высокой интенсивностью излучения в диапазоне 350-480 нм. Левый край полосы пропускания находится на длине волны более 364 нм. Время жизни фотолюминесценции – 3 нс. Световыход образцов кристаллов стильбена находится в диапазоне 13000-16000 фотон/МэВ.
3) Разработана лабораторная технология выращивания кристаллов гранатов состава $(Y, Lu, Ce)_3Al_5O_{12}$ и соответствующая технологическая инструкция. Проведена оптимизация условий роста методом ГНК-Багдасарова легированных кристаллов гранатов состава $(Y, Lu, Ce)_3Al_5O_{12}$, как материала эффективных сцинтилляционных элементов и были выращены кристаллы смешанных гранатов. Область применения: монокристаллы и прозрачная керамика иттрий-алюминиевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), легированные ионами Nd^{3+}, Er^{3+}, Yb^{3+} и др., как активные элементы эффективных твердотельных лазеров; монокристаллы и прозрачная керамика $Y_3Al_5O_{12}$, легированные ионами Ce^{3+}, последнее время привлекают всё больше внимания как сцинтилляторы ввиду сочетания сравнительно высоких значений плотности и световыхода, быстрой кинетики сцинтилляции, а также химической и радиационной стойкости, их назначение состоит в преобразовании ионизирующего излучения в видимое в медико-диагностических устройствах и средствах неразрушающего контроля;

4) Наряду с гранатами, радиационно-стойкие сцинтилляционные материалы на основе простых оксидов могут использоваться в качестве перспективных детекторов различных видов излучения. С точки зрения доступности исходных компонент и высоких сцинтилляционных характеристиках детектора наиболее перспективными рассматриваются структуры на основе ZnO. ZnO характеризуется присутствием краевой (380 – 400 нм, с характерным временем высвечивания менее 1 нс) и зеленой дефектной (максимум в области 450 – 650 нм, характерное время высвечивания порядка 1 мкс), компонент люминесценции. Из-за отсутствия коммерчески доступной технологии изготовления монокристаллов ZnO наибольший интерес сегодня представляют керамика, пленочные технологии, ансамбли микро и нанокристаллов различной морфологии.

На этапе 3 выполнения проекта разработаны лабораторные технологии выращивания нано- и микроструктур ZnO на сапфировых подложках с двухсторонней полировкой методом газофазного осаждения по механизму пар-жидкость-кристалл и методом реактивного магнетронного распыления цинковой мишени.

В ходе реализации Исследовательской программы разрабатывается радиационно- и термостойкая многослойная оптика дифракционного качества для синхротронов и лазеров на свободных электронах. По результатам этапа 3 были получены следующие важные результаты:

- Результаты исследований с использованием синхротронного источника термостойкости, рассеяния и качества волновых фронтов, отраженных от экспериментальных образцов многослойных рентгеновских зеркал, подтвердившие высокий уровень разработанных в рамках проекта методов изготовления и измерения радиационно-стойких зеркал для синхротронных применений;
- Макет коллимирующего многослойного зеркала с входными/выходными малорассеивающими щелями в корпусе, с возможностью предварительной юстировки положения зеркала;
- Лабораторная технология ионно-пучковой полировки, коррекции локальных ошибок и асферизации формы подложек из монокристаллического кремния для экспериментальных образцов многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества;
- Результаты исследований лабораторными методами шероховатости и формы подложек из монокристаллического кремния экспериментальных образцов многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества;
- Экспериментальные образцы многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества в количестве 3 шт.

Работа выполнена на мировом уровне, а научно-технические результаты получены впервые и позволяют приступить к созданию опытных образцов радиационно-стойкой многослойной оптики дифракционного качества для синхротронных применений.

2. В рамках работ по созданию **прототипов узлов и систем экспериментальных станций** существующих и создаваемых источников синхротронного излучения для постановки и апробации методик **«накачка-зондирование», когерентного дифракционного имиджинга**, реализации исследований, подготовки кадров и оснащения экспериментальной станции СИ были получены следующие результаты.

Разработана методика восстановления структуры объекта в методе когерентного рентгеновского дифракционного имиджинга (КДИ) в режиме птайкографии с использованием макета рентгенооптического устройства на основе фокусирующих элементов планарных кремниевых составных преломляющих линз (1D Si СПЛ) для обеспечения двумерной микронной и субмикронной фокусировки рентгеновского пучка с возможностью коррекции астигматизма оптической системы. Методика устанавливает процедуру экспериментального восстановления структуры объекта в методе когерентного дифракционного имиджинга в ближнем поле дифракции в режиме птайкографии с использованием 1D Si СПЛ для формирования вторичного источника СИ субмикронного размера. Методика рассчитана на исследование различных неорганических и органических, упорядоченных, частично упорядоченных и неупорядоченных микрообъектов с субмикронным (нанометровым) пространственным разрешением. Применение настоящей методики позволяет решать различные фундаментальные и прикладные задачи современного материаловедения, связанные с визуализацией структуры исследуемых микрообъектов.

Была разработана методика исследований оптических свойств микро- и нанофокусированных пучков для современных источников синхротронного излучения на основе методов ножевого сканирования, птайкографии, увеличивающей микроскопии. Указанные методы исследований включают использование кремниевой планарной преломляющей оптики и метод двумерной фокусировки, разработанные на 2-м этапе реализации проекта. Проведены эксперименты с применением методов, представленных в методике исследований, выполнены теоретические оценки оптических свойств сфокусированных пучков. Лабораторные и синхротронные эксперименты показали применимость разработанной методики для получения информации о размере и внутренней структуре микро- и нанопучков, полученных с помощью кремниевых планарных составных преломляющих линз (1D Si СПЛ). Использование двумерной камеры позволяет в экспресс-режиме определять положение фокальной плоскости СПЛ, фокусирующих в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Для точного измерения размера фокусного пятна следует использовать метод ножевого сканирования. Однако данный метод не дает информацию о внутренней структуре, а его точность сильно зависит от стабильности пучка, шума детектора интенсивности и шага перемещения ножа. Дополнительную информацию о характеристиках сфокусированного пучка можно получить с помощью СПЛ, передающей увеличенное изображение фокусного пятна на детектор. Данный метод позволяет обеспечить более высокую точность измерений по сравнению с методом ножевого сканирования при условии, что размер изображения фокусного пятна много больше, чем пространственное разрешение детектирующего устройства.

Когерентные методы рентгеновских исследований, представленные в разработанной методике с использованием 1D Si СПЛ, активно используются на лабораторных и синхротронных иностранных источниках СИ. Реализация этих методов позволит внедрить полученные результаты в работу исследовательских станций на установках класса «Мегасайенс» (КИСИ-Курчатов, СИЛА, СКИФ).

В рамках выполнения работ этапа 3 проекта получены следующие новые результаты в области разработки детектирующих систем:

1) разработана программа и методики и проведены лабораторные испытания сцинтилляционных элементов из $CdWO_4$, п-терфенила, стильбена, кристаллов смешанных гранатов и структур ZnO в составе макета детектора на основе CMOS-матрицы. Проведённые испытания показали, что кристаллы сцинтилляторы могут эффективно использоваться в быстрых детекторах рентгеновского излучения в диапазоне энергии до 45 кэВ. Малая толщина этих кристаллов позволяет достигать пространственного излучения до 6 мкм при относительно

высоком световом потоке;
2) проведена доработка макета оптической системы быстрого детектора рентгеновского излучения. Доработана конструкция оптической системы быстрого детектора позволяющая достигать разрешения до 2 мкм. Для исследования эффективности конвертирования рентгеновского излучения в видимый диапазон в разрабатываемой системе быстрого детектора разработан и изготовлен макет для получения спектров высвечивания кристаллов сцинтилляторов при их облучении рентгеновским излучением с энергией до 45 кэВ.;
В ходе реализации исследовательской программы разрабатываются макеты монофотонного датчика рентгеновского излучения и монофотонного датчика оптического излучения, регистрирующих пространственное распределение излучения на основе счета отдельных фотонов с высоким пространственно-временным разрешением, синхронизированных относительно заданного временного строба и друг с другом, – частота импульсов воздействия до 1 МГц, точность привязки к временному стробу не хуже 10 нс, пространственное разрешение не хуже 20 мкм, точность временной привязки к оптическому сенсору не хуже 10 нс. На этапе 3 выполнены следующие работы:
3) проведены лабораторные испытания макетов монофотонного датчика рентгеновского излучения и измерителя временной задержки относительно внешнего синхросигнала;
4) проведены лабораторные испытания макета монофотонного датчика оптического излучения;
Разработанные макеты успешно прошли испытания.
Разработана программа и методики и проведены испытания макета комбинированного оптико-рентгеновского измерительного комплекса на основе специализированного лазера. Исследованы технические характеристики объекта испытаний, проведен выбор оптимальных параметров комбинированного оптико-рентгеновского измерительного комплекса на основе специализированного лазера. Проведены измерения яркости источника рентгеновского излучения и его размера. Определены основные показатели, а именно интенсивность рентгеновского излучения и размер источника рентгеновского излучения. Получены следующие значения: размер пятна рентгеновского источника 4,2 мкм; значение интенсивности в 50 см от источника – $1{,}2*10^4$ квант/с.
По результатам проведенных испытаний произведена доработка макета комбинированного оптико-рентгеновского измерительного комплекса на основе специализированных лазеров. Реализована новая схема микрофокусного рентгеновского лазерно-плазменного источника (рентгеновский выход составляет примерно 1.6×10^9 фотон/с/2π с размером приблизительно 10×10 мкм) на основе излучения фемтосекундного волоконного лазера с низкой энергией и высокой частотой повторения импульсов, остро сфокусированного (числовая апертура примерно 0,2) на вращающуюся медную мишень в сочетании с автоматическим управлением на основе алгоритма машинного обучения с подкреплением, которое использует сигнал второй гармоники, генерируемой в приповерхностной плазме, в качестве обратной связи. Выход рентгеновского излучения оптимален при частоте повторения 2 МГц и средней мощности 20 Вт. Оптимальные условия (частота повторения лазерных импульсов, энергия лазерного импульса и пространственно-временное разделение между падающими импульсами) определяются балансом между дефокусировкой лазерного импульса в аблированной плазме при высоких частотах и воздействием лазерного импульса. Размер полученного лазерно-плазменного рентгеновского источника является минимальным среди известных подобных лазерно-плазменных рентгеновских источников. Полученные результаты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к размеру источника для фазово-контрастных измерений, что было продемонстрировано в проведенных тестовых экспериментах.
3. В ходе реализации исследовательской программы в части **разработки новых и усовершенствованию существующих методических, экспериментальных подходов** к управлению параметрами синхротронных экспериментов, созданию особых условий для образцов, детектированию излучения, позволяющих комбинировать внешние воздействия на образец (электрические, магнитные, оптические, акустические, механические и другие) и одновременно регистрировать данные, характеризующие комплекс свойств, в сочетании с времяразрешающими методами, а также в различных экспериментальных режимах (in situ, in operando и других), получены следующие результаты.

Проведена адаптация комплексной методики на основе комбинации методов рентгеновской дифракции, оптической коноскопии и регистрации акустической эмиссии для исследования процессов дефектообразования и разрушения материалов в условиях воздействия внешних механических статических, квазистатических и ультразвуковых нагрузок на лабораторном или синхротронном источнике рентгеновского излучения с применением адаптивных элементов рентгеновской оптики (АЭРО). Адаптированная методика основана на применении комбинации комплементарных методов времяразрешающей двух- и трехкристальной рентгеновской дифрактометрии, рентгеновской топографии, метода мониторинга и анализа акустической эмиссии (АЭ). Эти методы хорошо дополняют друг друга: рентгеновское излучение позволяет обнаруживать и классифицировать дефекты в кристаллической структуре, а акустическая эмиссия – получать качественную информацию о степени дефектности исследуемого образца, даже в том случае, когда воздействие внешней силы на образец все еще обратимо (зона упругих деформаций), в том числе обеспечивая возможность предсказания возникновения необратимых изменений. Так, методика позволяет установить однозначную связь между измеряемым акустоэмиссионым откликом и степенью дефектности исследуемого образца, а применение метода оптической коноскопии позволяет проводить предварительную неразрушающую характеризацию образцов. Проведенная адаптация методики позволит вывести исследования кристаллов в условиях внешних воздействий на качественно новый уровень.
Методика может быть также адаптирована для решения конкретных практических задач с учетом размеров, формы и ориентации кристалла, реальных нагрузок, конструкции прибора и других факторов. Ее использование совместно с изготовленными в рамках настоящего проекта модулями нагрузок, макетами с использованием АЭРО, позволит реализовать полноценные комплексные исследования перспективных кристаллов на лабораторных рентгеновских дифрактометрах.
В рамках реализации Исследовательской программы разрабатывается ряд макетов портативных устройств на основе адаптивных элементов рентгеновской оптики (АЭРО), которые могут использоваться как на лабораторных рентгеновских установках, так и на экспериментальных станциях источников синхротронного излучения.
На этапе 3 проекта:

1) Изготовлены компоненты макета монохроматора в корпусе на основе АЭРО с системой регистрации данных с временным разрешением для управления пространственно-временными параметрами рентгеновского и синхротронного излучения. В состав изготовленных компонент макета вошли два специализированных держателя для АЭРО с возможностью прецизионной настройки их положения, сами адаптивные элементы, а также независимая система автоматизированных устройств позиционирования и контроллер удаленного управления;
2) Изготовлена технологическая оснастка и проведена сборка макета монохроматора с использованием прототипа макета двухкристального монохроматора в корпусе на основе АЭРО с системой регистрации данных с временным разрешением для управления пространственно-временными параметрами рентгеновского и синхротронного излучения.
Использование в качестве кристаллов-монохроматоров АЭРО дает возможность значительно увеличить временное разрешение применяемых рентгеновских методов. Монохроматор на основе такой оптики легко интегрировать в рентгенооптические линии станций СИ. Модульность, а также простота реализации временного разрешения путем временной развертки сигнала детектора, обеспечивают возможность применения изготовленного макета монохроматора для модернизации широкого диапазона сканирующих методик рентгеновской дифракции, спектроскопии и других.
Предложенная концепция монохроматора позволяет модулировать спектральные параметры пучков с высокой гибкостью. Частота перестройки кристаллов-монохроматоров (~100 Гц) позволяет достигать временного разрешения до 10^{-2} с на одно измерение. Также возможно дальнейшее увеличение быстродействия при работе на высших резонансных гармониках.
Макет может применяться для быстрой рентгеновской спектроскопии поглощения рентгеновского излучения (Quick EXAFS, Quick XANES), так как позволяет быстро модулировать спектральные параметры монохроматического рентгеновского излучения путем двухкратной дифракции пучка на АЭРО, осциллирующих при приложении гармонического сигнала.
На станции «ПРО» источника СИ «КИСИ-Курчатов» был собран и протестирован макет монохроматора на основе АЭРО с системой регистрации данных с временным разрешением для управления пространственно-временными параметрами рентгеновского и синхротронного излучения. Установлено и протестировано программное обеспечение, необходимое для проведения автоматических экспериментов. Макет монохроматора прошел необходимые проверки, соответствует завяленным требованиям и полностью готов к проведению экспериментов на источнике «КИСИ-Курчатов».;
3) Изготовлен макет рентгенооптического устройства на основе модуля окружения образца, обеспечивающего деформационные механические и вибрационные (ультразвуковые) нагрузки.
Макет позволяет проводить исследования широкого круга кристаллических материалов в условиях динамических ультразвуковых нагрузок. В зависимости от свойств исследуемого кристалла – наличии или отсутствии пьезоэффекта – допускается использование двух различных типов ультразвуковых резонаторов – монолитных для кристаллов-пьезоэлектриков и составных для всех остальных. В первом случае сам исследуемый кристалл выступает в роли преобразователя – электрический периодический сигнал резонансной частоты, прикладываемый к кристаллу, вызывает динамическое изменение параметра кристаллической решетки благодаря пьезоэффекту. В случае, когда в исследуемом кристалле пьезоэффект отсутствует, используется составная конструкция – к образцу крепится кристалл-преобразователь с высокой добротностью колебаний, например, кварц, колебания которого передаются на исследуемый образец. Разработанный модуль позволяет проводить исследования с обоими описанными типами ультразвуковых резонаторов. Конструкцией модуля предусмотрена возможность использования пресса для экспериментов как в геометрии Брэгга, так и в геометрии Лауэ. В ходе дальнейших работ макет будет интегрирован в единый экспериментально-измерительный комплекс, созданный на базе дифрактометра ТРС. Его применение совместно с адаптивным монохроматором (рентгенооптическое устройства на основе АЭРО с системой регистрации комплекса данных с временным разрешением), разработанном и изготовленном на 2 этапе проекта, открывает новые возможности для исследования перспективных кристаллических материалов в условиях внешних динамических ультразвуковых нагрузок с временным разрешением;
4) Проведены лабораторные испытания макетов: рентгенооптического устройства на основе АЭРО с системой регистрации комплекса данных с временным разрешением; рентгенооптического устройства на основе модуля окружения образца, обеспечивающего деформационные механические и вибрационные (ультразвуковые) нагрузки. По результатам испытаний проведена доработка макета рентгенооптического устройства на основе адаптивного изгибного элемента рентгеновской оптики (АЭРО) с системой регистрации комплекса данных с временным разрешением.
В ходе испытаний было показано, что применение рентгенооптического устройства на основе АЭРО с системой регистрации комплекса данных с временным разрешением может заменить использование механических поворотных систем в ходе эксперимента. Время измерений в этом случае ограничивается лишь минимальным временем набора интенсивности, достаточной для аппроксимации полученных значений и построения экспериментальной зависимости интенсивности от номера канала. При этом увеличение числа каналов позволяет повысить точность получаемых данных, чего нельзя сделать в случае гониометрического сканирования, ввиду дискретности шага моторов. Также, увеличивая частоту колебаний АЭРО, устройство позволяет быстрее измерить интенсивность за полный период колебаний изгибного элемента, тем самым – обеспечить выигрыш по скорости проведения измерений. А в случае использования механических поворотных систем – скорость измерения ограничена скоростью вращения моторов.
Таким образом, использование рентгенооптического устройства на основе АЭРО с системой регистрации комплекса данных с временным разрешением может заменить использование механических поворотных систем в ходе эксперимента, а также сократить время измерений и повысить точность получаемых данных, что делает это устройство весьма эффективным для реализации рентгенодифракционных исследований перспективных кристаллических материалов в режиме реального времени.
5) Проведены лабораторные испытания на синхротроне макета рентгенооптического устройства на основе адаптивного изгибного элемента рентгеновской оптики (АЭРО), позволяющего проведение измерений методами рентгеновской дифракции и спектроскопии с временным разрешением. Показано, применение макета рентгенооптического устройства на основе изгибного АЭРО дает возможность значительно повысить временное разрешение методов рентгеновской дифрактометрии и спектроскопии поглощения. Компактность и модульность макета позволяют легко интегрировать его в стандартные рентгенооптические схемы для модернизации различных рентгеновских методов исследования.

Изготовлен многофункциональный стенд на основе модульной синхротроноподобной рентгенооптической схемы для структурной диагностики рентгеновской оптики, исследований кристаллических материалов и проведения испытаний макетов рентгенооптических устройств на основе АЭРО и макета модуля окружения образца для реализации in situ рентгенодифракционных исследований. Проведены лабораторные испытания многофункционального стенда для структурной диагностики рентгеновской оптики, исследований кристаллических материалов и проведения испытаний макетов. Многофункциональный синхротроноподобный стенд на базе лабораторного рентгеновского источника был изготовлен в соответствии с разработанной на 2 этапе проекта эскизной конструкторской документацией. Данный многозадачный стенд включает в себя комплекс оборудования с удобной, перестраиваемой в зависимости от целей экспериментов, модульной рентгенооптической схемой, которая обеспечивает формирование сфокусированных субмикронных пучков рентгеновского излучения с пространственной когерентностью. Условия работы на установке и управление экспериментом максимально приближено к условиям на экспериментальных станциях СИ.

К целям и задачам изготовленного многофункционального стенда относятся:

- Развитие целого класса когерентных рентгеновских методик (таких как КДИ, птайкография, полнопольная микроскопия и т.д.);
- Приобретение компетенций и подготовка к проведению экспериментов на модернизированном источнике «КИСИ-Курчатов», проектируемой мегаустановке СИЛА (источнике СИ 4-го поколения, а также лазере на свободных электронах) с недоступным ранее набором когерентных методик исследования; расширение возможностей проектируемых синхротронных станций в будущем;
- Обучение студентов и аспирантов в области когерентной рентгеновской визуализации, также подготовка научных кадров как для реализации исследований, так и обеспечения работы станций СИ (ответственные по станциям) существующих, модернизируемых и проектируемых источников СИ 3 и 4 поколений;
- Разработка и тестирование элементов (макетов устройств, инструментария, узлов и т.д.) когерентной рентгеновской оптики и систем окружения образца для новейших станций СИ, в особенности для проектируемой мегаустановки СИЛА.

По результатам лабораторных испытаний проведена доработка многофункционального стенда для структурной диагностики рентгеновской оптики, исследований кристаллических материалов и проведения испытаний макетов в соответствии с эскизной конструкторской документации, разработанной на 3 этапе проекта. Доработанный многофункциональный стенд полностью соответствует требованиям Исследовательской программы. Параметры доработанного многофункционального стенда полностью соответствуют заявленным. Многофункциональный стенд годен для эксплуатации.

В основе физико-химических исследований с использованием синхротронных источников при высоких давлениях выше 15 – 400 ГПа лежат методики с использованием камер с алмазными наковальнями. В рамках выполнения работ этапа 3 проекта в области исследований веществ в условиях сверхвысоких давлений были проведены сборка и наладка макета оптико-механического узла юстировки камеры высокого давления с возможностью оптических измерений спектров комбинационного рассеяния света для экспериментальной станции с рентгеновской дифракцией при высоких давлениях в алмазных наковальнях. Испытания подтвердили работоспособность макета узла юстировки камеры высокого давления с возможностью регистрации рамановских спектров. Размеры узла позволяют разместить его на лабораторном оптическом столе и синхротронной станции для проведения исследований при высоких давлениях. Точность и воспроизводилось перемещений соответствуют техническим параметрам узлов юстировки камер высокого давления, используемых в настоящее время на синхротронных станциях.

4. В ходе реализации исследовательской программы в части **разработки комплекса научно-образовательных методик и учебно-методических пособий** на базе создаваемой инфраструктурной основы **для обучения и подготовки кадров**, нацеленный на освоение междисциплинарных методик, повышение уровня компетенций в области рентгеновских и синхротронных исследований, и подготовку к экспериментам на источнике СИ, получены следующие результаты.

На 3 этапе реализации Исследовательской программы была проведена подготовка 5 аспирантов по дисциплине «Современные рентгеновские методы исследования динамики реальной структуры кристаллов в условиях внешних воздействий и когерентные методы визуализации» в рамках основных образовательных программ высшего образования и программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН по специальностям «Физика конденсированного состояния» (1.3.8) и «Кристаллография, физика кристаллов» (1.3.20).

Разработаны пять учебно-методических пособий «Специальный физический практикум специализации «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных исследований: оптика, спектроскопия, структурная диагностика вещества», «Введение в нейтронные методы исследований свойств конденсированных сред», «Методы исследования вещества с использованием рентгеновских лазеров на свободных электронах», «Теория излучения релятивистских частиц. Теория ондуляторного излучения», «Оптика полупроводников и сцинтилляторов» по дисциплинам, соответственно, «Специальный физический практикум», «Комплементарные синхротронные и нейтронные методы исследования свойств конденсированных сред», «Методы исследования вещества с использованием рентгеновских лазеров на свободных электронах», «Теория ондуляторного излучения и лазеры на свободных электронах», «Оптика полупроводников и сцинтилляторов» специализации «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных исследований: оптика, спектроскопия, структурная диагностика вещества» основной образовательной программы высшего образования «Фундаментальная и прикладная физика». На физическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова создана комиссия по оценке учебно-методических пособий по дисциплинам специализации «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных исследований: оптика, спектроскопия, структурная диагностика вещества» основной образовательной программы высшего образования «Фундаментальная и прикладная физика». Указанные учебно-методические пособия рекомендованы комиссией для использования в образовательном процессе в рамках реализации основной образовательной программы по специальности 03.05.02 «Фундаментальная и прикладная физика» при преподавании соответствующих учебных курсов студентам, выбравшим на старших курсах специализации в области физики твердого тела и оптических исследований, в том числе в рамках специализации «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных исследований: оптика,

спектроскопия, структурная диагностика вещества».
Проведено два лекционных мероприятия для школьников о действующих и проектируемых установках класса «мегасайенс» в России (в том числе УНУ «МЦНИ ПИК» и УНУ «КИСИ-Курчатов») по темам: «Нейтроны: какая польза от нейтральных частиц?» и «Зачем нужны синхротроны?». На первом мероприятии присутствовало 60 школьников, на втором – 33 школьника. Оба мероприятия вызвали живой интерес аудитории, школьники и сопровождающие их лица задавали вопросы о возможностях синхротронного излучения и нейтронов для исследования структуры вещества.
В настоящее время по специализации «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных исследований: оптика, спектроскопия, структурная диагностика вещества» основной образовательной программы высшего образования «Фундаментальная и прикладная физика» на 3-ем курсе проходят подготовку 20 студентов. В рамках дисциплины «Научно-исследовательский семинар» специализации был организован цикл встреч с ведущими учеными НИЦ «Курчатовский институт», специализирующимися в области исследований вещества с использованием синхротронных, нейтронных и комплементарных синхротронно-нейтронных методов; с ведущими учеными, занятыми разработкой в рамках реализации Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы источника синхротронного излучения четвертого поколения с лазером на свободных электронах «СИЛА»; организована экскурсия по лабораториям ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.
Проведена подготовка 13-ти специалистов по программе «Диагностика структуры и свойств кристаллических материалов с использованием акустических, оптических и рентгеновских методов», НИУ МЭИ.
Разработана программа дополнительного профессионального образования (ДПО) «Методы формирования двухмерной фокусировки рентгеновского излучения, и исследование оптических свойств микро- и нано-сфокусированных пучков», БФУ им. И.Канта.
Программа ДПО рассчитана на лиц, имеющих или получающих среднее профессиональное или высшее образование. Оптимальная форма и длительность обучения подходит для получения дополнительного образования работающих студентов. В ходе очных занятий есть возможность обмена опытом с другими обучающимися и коммуникаций с экспертами в изучаемой области. В рамках дистанционных занятий существует возможность повторения пройденного материала в удобное время для каждого слушателя, а также возможность обучения без отрыва от основного обучения. За время обучения слушатели успевают погрузиться в обучение, но не устать от него.
Уникальными можно выделить такие особенности, как: узкая направленность обучения (данная программа предполагает получение специализированных знаний и компетенций в области рентгеновской оптики); наличие практических занятий в программе, например, реализация оптической схемы для проведения эксперимента на лабораторном и синхротронном источниках.
Подготовка специалистов по программе ДПО проходила в период с 13 ноября по 1 декабря 2023 года в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего образования. Обучение проходило как в очном формате, так и в дистанционном на онлайн-платформе. Всего в обучении приняло участие 20 человек, которые параллельно получают высшее образование в ОНК «Институт высоких технологий» БФУ им. И. Канта. Учебный план состоял из 5 разделов на который было выделено 72 академических часа. Практические занятия проходили на базе МНИЦ «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс», БФУ им. И. Канта.
Программа ДПО «Масштабная диагностика конденсированных сред рентгенодифракционными и комплементарными методами на синхротронном излучении» (256 часов, 18 недель) для аспирантов, преподавателей, научных сотрудников и магистрантов была разработана и реализована на 3 этапе проекта в РТУ МИРЭА. В ходе реализации программы ДПО в 2023 году подготовлено 11 специалистов, которые по результатам Аттестационных работ получили дипломы о профессиональной переподготовке.
Секция «Получение и комплексная диагностика материалов рентгенодифракционными и комплементарными методами на синхротронном и нейтронном излучении» организована и проведена в рамках ежегодной Национальной научно-технической конференции с международным участием «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ - 2023»), которая состоялась 10 - 15 апреля 2023 г. в институте перспективных технологий и индустриального программирования российского технологического университета МИРЭА (ИПТИП РТУ МИРЭА).
Секция «Применение синхротронного излучения и информационных технологий в современном материаловедении» организована и проведена в рамках ежегодной 8-ой научно-технической конференции студентов и аспирантов РТУ МИРЭА, 22 – 27 мая 2023 г. в РТУ МИРЭА. Секция проведена 25 мая 2023 г. в одном из кампусов РТУ МИРЭА по адресу: г. Москва, ул. М. Пироговская, д. 1, стр. 5, аудитория А-400.
Проведена подготовка 95 специалистов по программе дополнительного профессионального образования «Синхротронные и нейтронные методы исследования конденсированных фаз. Синхротронные и рентгеновские методы диагностики структуры функциональных материалов» в объеме 72 часов, ФГБУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева.
Международная конференция молодых исследователей и специалистов «Синхротронные и нейтронные методы исследования конденсированных фаз» была организована и проведена в рамках Международного конгресса по химии и химической технологии» (МКХТ-2023). Конференция состоялась 17 октября 2023 г. в Тушинском комплексе РХТУ им.Д.И. Менделеева на кафедре химии и технологии кристаллов. Устные доклады были представлены в очном (оффлайн) и дистанционном (онлайн) формате, была организована трансляция конференции для иногородних участников. Доклады были посвящены актуальным вопросам исследования структуры конденсированных фаз методами синхротронного, нейтронного и рентгеновского излучения, а также созданию новых материалов для регистрации излучений в аналитических целях.
5. В ходе реализации исследовательской программы в процессе испытаний разрабатываемых методик рентгеновской и синхротронной диагностики материалов **проведены исследования и получены новые знания о структуре и свойствах функциональных материалов и наноразмерных структур**, создаваемых с использованием новейших принципов построения. В рамках данных работ были получены следующие результаты.
Проведено исследование при высоких давлениях рентгеновской дифракции гидридов олова и железа, соединений системы Fe-Si, а также сверхтонких взаимодействий на

мёссбауэровских ядрах олова и железа при высоких давлениях и криогенных температурах. Магнитные и электронные свойства соединений FeH_x исследованы методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии (NFS) на ядрах железа Fe-57. NFS эксперименты выполнены при высоких давлениях в температурном диапазоне 4 – 300 К и во внешних магнитных полях до 5 Тесла. По данным NFS обнаружено как минимум семь различных соединений FeH_x с совершенно разными электронными и магнитными свойствами. Значение температуры Нееля T_N, установленное для фазы FeH_2 при давлении 82 ГПа, составляет около 174 К.

Проведены рентгенодифракционные, рентгеноструктурные и электрофизические исследования реальной структуры и активации носителей заряда функциональных нецентросимметричных кристаллов при освещении высокоинтенсивным лазерным излучением.

В результате исследований при 293 и 85 К методом рентгеноструктурного анализа восьми образцов монокристалла ниобата лития (немодифицированных и отожженных при 800°С) выявлены особенности их строения и установлена общая картина дефектов: разупорядочение решетки атомов ниобия, вакансии в решетке атомов лития и возможные вакансии в решетке атомов кислорода. Качественно картина дефектов в структуре всех образцов одна и та же, количественно она меняется от образца к образцу. Это свидетельствует о неравномерном распределении в объеме кристаллической були дефектов, возникающих в процессе роста кристаллов и их последующего отжига. По результатам исследования методом имаджинга кривой качания определено, что исходные параметры образца указывают на наличие крупных дефектов, обусловленных особенностями роста сегнетоэлектрических кристаллов (разориентированные блоки, доменная структура), а также точечных дефектов (центров окраски), возникающих в результате высокотемпературного отжига в вакууме, что хорошо коррелирует с результатами, полученными методом РСА. Воздействие лазерного излучения на образец приводит к существенным изменениям параметров КДО. Релаксация регистрировалась спустя 25 минут, что существенно превосходит время необходимое для возвращения образца к комнатной температуре, однако за это время его рентгенодифракционные параметры не успевают вернуться в исходное состояние, а происходят заметно позднее, спустя несколько часов. Таким образом можно говорить о том, что в результате воздействия лазерного излучения на образец наблюдается миграция носителей заряда и формирование области нескомпенсированного заряда. Долгая (более 25 мин) релаксация образца обусловлена его высоким темновым сопротивлением, которое замедляет процесс рекомбинации фотоиндуцированных носителей заряда.

По результатам экспериментальных исследований электрофизическом методом измерения фотоиндуцированного тока была выявлена явная зависимость кинетики и величины плотности фототока от концентрации точечных дефектов. При малых концентрациях (малая температура отжига) величина и кинетика плотности фототока схожа с неотожженным образцом. При повышении концентрации точечных дефектов в кристалле (температуры отжига кристалла) наблюдается изменение величины плотности фототока, которая существенно увеличивается с повышением интенсивности лазерного излучения, что видно по наклону соответствующих кривых (образцы, отожженные при 600, 700 и 800°С). При этом в случае наибольшей концентрации точечных дефектов (800°С) величина плотности фототока ниже, чем для образца, отожжённого при 700°С. Таким образом, существует предельная концентрация точечных дефектов, после превышения которой эффективность преобразования лазерного излучения в фототок начинает спадать.

Проведены экспериментальные исследования монокристаллов парателлурита при совместном применении методов акустооптической видеоспектрометрии, оптической поляризационной микроскопии и акустической эмиссии. В качестве видеоспектрометра использован двойной акустооптический монохроматор ближнего инфракрасного диапазона. Для реализации режима оптической поляризационной микроскопии использована одновременная регистрация четырех поляризационных изображений, обеспечивающая вычисление в реальном времени пространственных распределений угла и степени деполяризации линейно поляризованного излучения подсветки. Разработан специализированный экспериментальный стенд, обеспечивающий синхронную регистрацию данных этими тремя методами при нагружении кристаллов. Многочисленные исследования образцов монокристаллов парателлурита с помощью данного стенда позволили установить взаимосвязь характера их структурных повреждений и свойств с данными акустической эмиссии, оптической поляризационной микроскопии и акустооптической видеоспектрометрии.

Проведены исследования с использованием синхротронного источника термостойкости, рассеяния и качества волновых фронтов, отраженных от экспериментальных образцов многослойных рентгеновских зеркал.

Результаты исследований показали, что даже относительно небольшие мощности СИ приводят к заметным, единицы мкрад, угловым ошибкам и, как следствие волновым аберрациям, не позволяющим говорить о дифракционном качестве отраженных волновых фронтов. Понижение температуры кремниевых зеркал до температуры жидкого азота кардинально улучшает термостабильность зеркал, так как коэффициент конвективной теплоотдачи возрастает в 10 раз, а коэффициент температурного расширения находится в окрестности нулевых значений. Однако из-за кипения азота заметно увеличиваются вибрации зеркал, которые могут повлиять на качество отраженных фронтов даже больше, чем тепловые деформации. На практике этот метод используется редко. Подтвердившим свою эффективность способом понижения термоиндуцированных деформаций является усложнение конструкции подложки зеркала за счет боковых проточек. Расчеты показываю, что их использование более чем на порядок снижает термоиндуцированные деформации отражающей поверхности.

Полученные данные описанных исследований были учтены при изготовлении экспериментальных образцов зеркал.

Из полученных экспериментальных данных по качеству отраженных волновых фронтов и диффузному рассеянию рентгеновского излучения от экспериментальных образцов зеркал следует, что разработанные в ходе проекта методы изготовления подложек из монокристаллического кремния позволяют изготавливать многослойные рентгеновские зеркала с коэффициентами отражения и диффузного рассеяния близкими к результатам, получаемым при использовании в качестве подложек стандартных для микроэлектронной промышленности кремниевых суперполированных пластин.

Были проведены синхротронные исследования структуры многослойных рентгеновских зеркал. Получены распределения профилей электронной плотности по глубине, определены толщины и шероховатости слоев. Можно отметить, что отражательная способность в области полного внешнего отражения имеет пиковую интенсивность, что подтверждает эффективность исследуемых структур в качестве рентгеновских зеркал.

Были проведены синхротронные исследования тонких пленок ZnO, полученных на подложках Al_2O_3. Рентгенодифракционными методами были получены данные как о микроструктуре (строении) образцов пленок ZnO, так и совершенстве их кристаллической структуры. Определены напряжения в кристаллической структуре и разброс по углам наклона кристаллитов, средний размер ОКР в исследуемых пленках ZnO составил около 30 нм в преимущественной ориентации [0001], что значительно меньше их толщины. Полученные данные позволяют усовершенствовать технологию получения таких структур ZnO.

Проведены исследования люминесцентных свойств монокристаллов смешанных гранатов, нано и микроструктур ZnO.

Были исследованы 23 образца кристаллов на основе смешанных гранатов общей формулы $(Ln1)_3Al_5O_{12}:(Ln2)^{3+}$, где Ln1 – это Y, Lu или их комбинация, а Ln2 – это Ce: измерены спектры рентгенолюминесценции, спектры пропускания, кривые спада рентгенолюминесценции и световыход сцинтилляций. В спектрах пропускания зарегистрированы характерные для иона Ce^{3+} полосы поглощения. На основании кривых пропускания были получены спектры поглощения и вычислены показатели поглощения, соответствующие максимумам полос поглощения Ce. Кинетики рентгенолюминесценции во всех случаях содержат три основные компоненты – быстрое излучение церия со временем спада 60-80 нс, соответствующее 5d→4f переходам Ce^{3+} и излучение, связанное с основой кристалла, которое состоит из нескольких компонент, имеющих время спада 190-350 нс и порядка 1-1.5 мкс. В связи с большим временем спада излучение основы является нежелательным для ряда практических применений. Построенные концентрационные ряды показывают, что световыход излучения церия растет при увеличении концентрации активатора. Это, в свою очередь, сопровождается уменьшением интенсивности люминесценции основы. Данные выводы также подтверждаются измерениями кинетики. Показано, что вклад быстрой компоненты монотонно растет с увеличением концентрации активатора, достигая значений, близких к 100%. Измерения концентрационной зависимости интенсивности излучения церия позволяют предположить, что при больших концентрациях наступает концентрационное тушение. В результате проведенных исследований определены оптимальные концентрации ионов церия в кристаллах, при которых достигаются максимальные интенсивность рентгенолюминесценции и световыход сцинтилляций, а также обеспечивается почти полное устранение медленных компонент в кинетике люминесценции.

Для 14 образцов микроструктур ZnO были измерены спектры рентгенолюминесценции. Все образцы демонстрировали наличие как быстрой краевой люминесценции, так и медленной зеленой. Для образцов на прозрачной подложке были измерены спектры пропускания, по которым можно оценить положение края фундаментального поглощения (~ 390 нм).

Исходя из задачи Исследовательской программы – разработки эффективных материалов для сцинтилляционного детектирования рентгеновского излучения, - были проведены исследования радиационной стойкости образцов кристаллов смешанных гранатов, нано- и микроструктур ZnO по отношению к непрерывному рентгеновскому излучению. Чтобы реализовать условия, наиболее приближенные воздействию синхротронного излучения, использовали трубку с вольфрамовым антикатодом для генерации «жестких» рентгеновских квантов ($\lambda \approx 0.5$ Å) с высокой плотностью мощности (трубка БСВ45-W, U до 45 кВ, I до 30 мА, мощность до 2.7 кВт). В качестве показателя фиксировали интенсивность рентгенолюминесценции образцов при различных дозах облучения. Также исследовались: спектры поглощения, кинетика рентгенолюминесценции и световыход сцинтилляций образцов до и после максимальной дозы облучения. Образцы кристаллов смешанных гранатов продемонстрировали высокую радиационную стойкость к рентгеновскому излучению. В процессе облучения не изменялась интенсивность люминесценции, а такие параметры образцов кристаллов, как кинетика затухания люминесценции и световыход сцинтилляций оставались неизменными после воздействия максимальной дозы облучения. Нано и микроструктуры (пленки) ZnO также оказались стойкими к воздействию жесткого, мощного рентгеновского излучения, приближающегося по характеристикам к синхротронному излучению.

Дополнительно исследовали радиационную стойкость образцов кристаллов смешанных гранатов, нано- и микроструктур ZnO по отношению к непрерывному во времени фокусированному пучку электронов средней энергии (70 кэВ) при плотности потока 10^{21} $см^{-2}с^{-1}$ в условиях вакуума $9 \cdot 10^{-5}$ Па. Наиболее стойкими оказались микроструктуры ZnO в виде структур из сросшихся микрокристаллов ZnO в виде сплошной пленки. Другие структуры ZnO разлагались с поверхности пучком электронов.

На 3 этапе проекта проведены исследования в условиях низких и комнатных температур реального состава и строения крупномасштабных многофункциональных монокристаллов универсального назначения с применением синхротронного излучения.

Впервые проведенный монокристальный рентгеновский дифракционный анализ с применением синхротронного излучения концентрационной серии кристаллов $Ca_3(VO_4)_2$ (CVO), выращенных методом Чохральского, легированных сверхстехиометрически 0.01, 0.05 и 0.1 мас.% Cr_2O_3, вместе с анализом кристаллохимического поведения ионов хрома, позволил установить реальные составы кристаллов, записанные в общем виде $(Ca,Cr)[(V^{5+},\nu)O_4]_2$ (ν -вакансии). Хром имеет валентное состояние 3+ и октаэдрическую координацию в зеленых кристаллах CVO:Cr (CVO:0.01Cr, CVO:0.05Cr и CVO:0.1Cr) и валентное состояние 4+ и тетраэдрическую координацию в желтых образцах (CVO:0.01Cr - нижняя часть кристалла; CVO:0.05Cr - отожженный кристалл). Модели перестройки двухшапочной CaO_8 и одношапочной тригональной призмы CaO_7 (вакансионная трехшапочная тригональная призма) в октаэдр $Cr^{3+}O_6$, а также CaO_8, CaO_7 и CaO_6 в тетраэдр $Cr^{4+}O_4$ с суперпозицией соответствующих полиэдров в кристаллической структуре CVO:Cr согласуются с недавними результатами, полученными для кристаллов CVO:Mn и CVO:Co. Это может свидетельствовать об общем структурном поведении кристаллов CVO, активированных ионами переходных металлов (топологическая структура), но с появлением специфических структурных особенностей, зависящих от природы и концентрации легирующих ионов и способов их введения (кристаллическая структура).

Впервые проведено рентгеновское исследование с использованием синхротронного излучения поликристаллических твердых растворов $Ca_{3-x}Sr_x)(VO_4)_2$ с $x = 0.3$, 0.54, 0.9, 1.2, 1.35 и кристаллических, выращенных методом Чохральского $(Ca_{1.8}Sr_{1.2})(VO_4)_2$ (CSVO) и $(Ca_{2.4}Sr_{0.6})(VO_4)_2$, легированных 0.5 и 1.0 вес.% Tm_2O_3 (CSVO:Tm), позволили установить отличие исходных составов CSVO и CSVO:Tm от уточненных. Корректность любого объяснения этого различия может быть обеспечена при условии, что аналогичный структурный

эксперимент будет проведен на микрочастях, взятых из другой области кристаллической були. Рентгеноструктурный анализ и уточнение методом Ритвельда показали различия в распределении ионов Sr^{2+} по кристаллографическим позициям монокристаллических и поликристаллических витлокитоподобных структур: в монокристаллах ионы Sr^{2+} расположены в одно- Ca2 и двухшапочных Ca3 тригонально-призматических позициях (CSVO) и дополнительно в октаэдре Ca4 (CSVO:Tm); в поликристаллах ионы Sr^{2+} помимо позиций Ca2 и Ca3 занимают двушапочную тригонально- призматическую позицию Ca1. Образование двух независимых полиэдров $Ca5O_4$ и $Ca5AO_6$ с тетраэдрическим и октаэдрическим окружением обнаружено методом рентгеноструктурного анализа для номинально чистого CSVO и в литературе не описано. Для тулия, занимающего октаэдрическую позицию Ca4 в структуре CSVO:Tm, установлен формальный заряд 3+ и 8-координированное кислородное окружение с появлением дополнительного межузельного кислорода. Образование индивидуального координационного полиэдра для примеси редкоземельного элемента, отличного от координации основного атома матрицы-хозяина, обусловлено природой катиона редкоземельного элемента и указывает на упорядоченность полиэдров, обнаруженную методом рентгеновской дифракции на ранних стадиях разложения твердых растворов.
Впервые изучено влияние оксидов титана (IV) разной природы, а именно наночастиц (NSH:Ti(1)) и золей (NSH:Ti(2)), на структурное поведение, нелинейно-оптические и спектроскопические характеристики нанокомпозитов на основе $NiSO_4{\cdot}6H_2O$ при получении их растворным методом. Рентгеноструктурным анализом совместно с рентгеноабсорбционными и спектроскопическими исследованиями установлено вхождение диоксида титана в межблочное пространство для кристаллов NSH:Ti(1) и в кристаллическую структуру для NSH:Ti(2). В структуре NSH:Ti(2) обнаружено наличие ионов Ti^{4+} в междоузлиях ($Ti_i^{m\cdot}$) и вакансий в позициях никеля ($V_{Ni}^{n¢}$) по квазихимической реакции 0 ® $V_{Ni}^{n¢}$ + $Ti_i^{m\cdot}$. Установлено образование структуры рутила с ионами Ti^{4+}, имеющими октаэдрическую координацию, расположенными между блоками в мозаичных кристаллах NSH:Ti(1), а не в кристаллической структуре. Впервые наблюдается эффект кристаллизации наноразмерной h-фазы непосредственно в кристаллической матрице NSH за счет структурно-геометрического соответствия 2D-проекций NSH и TiO_2 со структурой рутила. Для всех исследованных образцов установлен слабый эффект ГВГ. Высокое пропускание (~80%) в диапазоне 220 – 320 нм, умеренное пропускание (~60%) в диапазоне 450 – 570 нм, относительно низкое пропускание (~20 – 30%) в диапазоне 830 – 870 нм и сильное поглощение в других спектральных диапазонах наблюдается для всех образцов.

8.3. Создание конкурентоспособного на мировом уровне научного коллектива

Проведены исследования лабораторными методами шероховатости и формы подложек из монокристаллического кремния экспериментальных образцов многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества с привлечением ученого из Индии (Niranjan Kumar), исследования в рамках проекта проводили более 40 молодых ученых.

8.4. Подготовка кадров и развитие кадрового потенциала

В 2023 году разработаны программы ДПО «Методы формирования двухмерной фокусировки рентгеновского излучения, и исследование оптических свойств микро- и нано-сфокусированных пучков»; «Масштабная диагностика конденсированных сред рентгенодифракционными и комплементарными методами на синхротронном излучении». По программам ДПО, разработанным в 2021-2023 годах обучено в 2023 году 139 специалистов, 18 студентов, 6 аспирантов.

8.5. Создание сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации
(указывается, если исследовательская программа (проект) предусматривает реализацию данного мероприятия)

В рамках развития научно-исследовательской инфраструктуры проведена сборка и наладка макета оптико-механического узла юстировки камеры высокого давления с возможностью оптических измерений спектров комбинационного рассеяния света для экспериментальной станции с рентгеновской дифракцией при высоких давлениях в алмазных наковальнях.

8.6. Приобретение за счет средств гранта и внебюджетных средств оборудования, материалов, информационных и других ресурсов

В процессе выполнения проекта были приобретены комплектующие для разработки макетов научного оборудования, необходимого для проведения исследований :Макет комбинированного оптико-рентгеновского измерительного комплекса на основе специализированного лазера; Лазер MSL-FN-671-S/300mW/1% с блоком питания PSU-H-FDA и теплоотводом TC-01;Лазер MSL-FN-457-S/150mW/1% с блоком питания PSU-H-FDA и теплоотводом TC-01; Макет оптико-механического узла юстировки камеры высокого давления; Макет рентгенооптического устройства на основе планарных кремниевых составных преломляющих линз 1D Si СПЛ; Макет модуля окружения образца для реализации in situ рентгенодифракционных исследований в условиях постоянного, переменного и импульсного воздействий внешнего электрического поля; Спектральная камера для регистрации заряженных частиц AdvaPIX Timepix3 (версия CdTe 1000 мкм); Моторизированная гониометрическая платформа Kohzu на 6 осей;Моторизированная гониометрическая платформа Kohzu на 6 осей;Чиллер K3 Applied Thermal Control;Преобразователь напряжения высоковольтный XDF60N3TR; Моторизированная поворотная платформа, тип А Kohzu RA07A-W02-BM, штМоторизированная поворотная платформа, тип Б Kohzu RA10A-W01-BM, Макетный образец устройства диагностики объема тепловой камеры (УДОТК; Макетный образец устройства диагностики поверхности и атмосферы тепловой камеры (УДПАТК; Макетный образец устройства электромагнитной защиты (УЭМЗ) поверхности расплава; Макет устройства для проведения исследований начальной стадии кристаллизации класса высокомолекулярных соединений, а также инструменты и необходимая оснастка для изгоовления, сборки и испытания созданных макетов научного оборудования.

8.7. Сведения о соисполнителях исследовательской программы (проекта)

№ п/п	Наименование организации-соисполнителя	ИНН организации-соисполнителя	Реквизиты соглашения с соисполнителем	Срок, на который заключено соглашение с соисполнителем	Тип организации-соисполнителя	Номер (номера) этапов, на которые привлекался соисполнитель	Мероприятия Федеральной программы, для реализации которых привлекался соисполнитель	Работы, которые выполнялись соисполнителем	Результаты, которые получены соисполнителем	Фактический размер расходов за отчетный период, тыс. руб.	
										Объем финансирования работ соисполнителя за счет средств гранта в отчетном периоде, тыс. руб.	Объем финансирования работ соисполнителя за счет средств внебюджетных источников в отчетном периоде, тыс. руб.
										2023 г.	2023 г.
1	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова	7729082090	договор от 27.10.2021 №8418.21.06	до 15.12.23	образовательная организация высшего образования	1,2,3	3	3.3.11. Разработка в 2023 г. учебно-методических пособий по дисциплинам специализаци и и «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных	Разработано 5 учебно-методических пособий по дисциплинам специализаци и и «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных исследований	2500	0

	» (МГУ имени М.В. Ломоносова)							исследований: оптика, спектроскопия, структурная диагностика вещества» основной образовательной программы высшего образования «Фундаментальная и прикладная физика» 3.3.12 Подготовка в 2023 г. специалистов по специализации и «Физика и методы синхротронных, нейтронных и лазерных исследований: оптика, спектроскопия, структурная диагностика вещества» основной	: оптика, спектроскопия, структурная диагностика вещества» основной образовательной программы высшего образования «Фундаментальная и прикладная физика» Обучено 18 студентов 3 курса. Проведены два лекционных мероприятия для школьников			

								образовательной программы высшего образования «Фундаментальная и прикладная физика» 3.3.13 . Проведение научно-просветительских лекционных мероприятий для школьников о действующих и проектируемых установках класса «мегасейенс» в России (в том числе УНУ «МЦНИ ПИК» и УНУ «КИСИ-Курчатов»)			
2	Федеральное государственное бюджетное образовательное	7722019652	договор от 27.10.2021 №8418.21.07	до 15.12.23	образовательная организация высшего образования	1,2,3	1,3	3.1.19. Проведение 2023 г. исследований в условиях низких и комнатных	представлены протоколы исследований в условиях низких и комнатных температур	2666	0

	учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет							температур реального состава и строения крупномасштабных многофункциональных монокристаллов универсального назначения с применением синхротронного излучения 3.3.5. Разработка программы дополнительного профессионального образования «Масштабная диагностика конденсированных сред рентгенодифракционными и комплементарными методами на синхротронном излучении» 3.3.6. Подготовка специалистов	реального состава и строения крупномасштабных многофункциональных монокристаллов универсального назначения с применением синхротронного излучения. Разработана программы ДПО «Масштабная диагностика конденсированных сред рентгенодифракционными и комплементарными методами на синхротронном излучении». Подготовлено 11 специалистов. Проведены конференции		

								по программе дополнительн ого профессионалльного образования «Масштабная диагностика конденсированных сред рентгенодифракционными и комплементарными методами на синхротронном излучении» 3.3.7. Организация и проведение в 2023 г. секции «Получение и комплексная диагностика материалов рентгенодифракционными и комплементарными методами на синхротронном и нейтронном				

								излучении» в рамках ежегодной научно-технической конференции РТУ МИРЭА 3.3.8. Организация и проведение в 2023 г. секции «Применение синхротронного излучения и информационных технологий в современном материаловедении» в рамках ежегодной научно-технической конференции студентов и аспирантов РТУ МИРЭА			
3	Федеральное государственное бюджетное образовател	7722019652	договор от 27.10.2021 №8418.21.08	до 15.12.23	образовательная организация высшего образования	1,2,3	1,3	3.1.18 Проведение экспериментальных исследовани	Представлены результаты исследований монокристалл	3000	0

	ьное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)							й монокристалл ов методами акустической эмиссии, акустооптиче ской видеоспектрометрии и оптической поляризационной микроскопии. 3.3.2.. Подготовка в 2023 г. специалистов по программе «Диагностика структуры и свойств кристаллических материалов с использованием акустических, оптических и рентгеновских методов».	ов методами акустической эмиссии, акустооптиче ской видеоспектрометрии и оптической поляризационной микроскопии. Подготовлено 13 специалистов		
4	Федеральное	3906019856	договор от 02.11.2021	до 15.12.23	образовательная	1,2,3	1,3	3.1.15 Разработка	Разработана методика	6000	0

	государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (БФУ им. И.Канта)		№8418.21.09		организация высшего образования			методики исследований оптических свойств микро- и нанофокусированных пучков для современных источников синхротронного излучения (метод ножевого сканирования, метод птайкографии, метод увеличивающей микроскопии) 3.3.3. Разработка программы дополнительного профессионального образования «Методы формирования двухмерной фокусировки рентгеновского го	исследований оптических свойств микро- и нанофокусированных пучков для современных источников синхротронного излучения Разработана программ ДПО . Подготовлено 20 специалистов			

								излучения, и исследование оптических свойств микро- и нано-сфокусированных пучков» 3.3.4 Подготовка специалистов по программе дополнительного профессионального образования «Методы формирования двухмерной фокусировки рентгеновского излучения, и исследование оптических свойств микро- и нано-сфокусированных пучков»			
5	Федеральное государственное бюджетное н	5260003387	договор от 27.10.2021 №8418.21.10	до 15.12.23	научная организация	1,2,3	1	3.1.16. Исследование с использовани	Представлены результаты всех исследований по	2500	500

	аучное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)							ем синхротронного источника термостойкости, рассеяния и качества волновых фронтов, отраженных от эксперимента льных образцов многослойных рентгеновских зеркал 3.1.17 Разработка и изготовление макета коллимирующего многослойного зеркала с входными/выходными малорассеивающими щелями в корпусе, с возможностью предварительной юстировки положения зеркала	3.1.6,3.1.25), разработан и изготовлен макет коллимирующего многослойного зеркала . Разработана лабораторная технология ионно-пучковой полировки, коррекции локальных ошибок и асферизации формы подложек из монокристаллического кремния. Изготовлены экспериментальные образцы многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества.			

								3.1.24 Разработка лабораторной технологии ионно-пучковой полировки, коррекции локальных ошибок и асферизации формы подложек из монокристаллического кремния для экспериментальных образцов многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества 3.1.25 Исследование лабораторными методами шероховатости и формы подложек измонокристаллического кремния экспериментальных			

								образцов многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества 3.1.41. Изготовление экспериментальных образцов многослойных рентгеновских зеркал дифракционного качества			

6	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имении Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН)	5031003120	договор от 27.10.2021 №8418.21.11	до 15.12.23	научная организация	1,2,3	1	3.1.2. Получение экспериментальных образцов кристаллов вольфрамата кадмия для сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений синхротронных источников и проведение их исследовательских испытаний.	Выращены и испытаны экспериментальные образцы кристаллов вольфрамата кадмия для сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений синхротронных источников	4600	0
7	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)	7734111035	договор от 02.11.2021 №8418.21.12	до 15.12.23	научная организация	1,2,3	1	3.1.10 Изготовление технологической оснастки и сборка макета монохроматора с использованием прототипа макета двухкристального монохроматора	Собран макет монохроматора с изготовленной оснасткой для проведения испытаний на станции КИСИ-Курчатов. Проведены испытания макета.	3000	0

								ра в корпусе на основе АЭРО с системой регистрации данных с временным разрешением для управления пространств е нно-временными параметрами рентгеновск о го и синхротронн ого излучения. Проведение лабораторны х испытаний макета монохромат о ра на источнике синхротронн ого излучения "КИСИ-Курчатов"»			
8	Общество с ограниченно й ответственн остью научно - производств енное предприятие «Наноструктурная	6453078091	договор от 27.10.2021 №8418.21.13	до 15.12.23	организация реального сектора экономики	1,2,3	1	3.1.21 Разработка и изготовлени е эксперимент а льных образцов эллиптически х концентрато	Разработаны и изготовлены эксперимент а льные образцы концентрато р ов, пластин и	1100	4642.18

	Технология Стекла» (ООО НПП «НТС»)							р ов 3.1.22 Разработка и изготовлени е эксперимент а льного образца зонной пластинки Френеля из аморфных материалов 3.1.23. Разработка и изготовлени е эксперимент а льного образца рентгеновск о го волновода из аморфных материалов 3.1.43 Разработка программы и методики и проведение испытаний макета комбинирова нного оптико-рентгеновск о го измерительн о го комплекса на основе специализир	волновода. Разработана ПМ и проведены испытания макета комбинирова нного оптико-рентгеновск о го измерительн о го комплекса на основе специализир о ванного лазера			

								ованного лазера.			
9	Акционерное общество «Научно-технический центр «Реагент» (АО «НТЦ «Реагент»)	7736052770	договор от 27.10.2021 №8418.21.14	до 15.12.23	организация реального сектора экономики	1,2,3	1	3.1.20 Проведение лабораторных испытаний макетов монофотонного датчика рентгеновского излучения и измерителя временной задержки относительно внешнего синхросигнала 3.1.42 Проведение лабораторных испытаний макета монофотонного датчика оптического излучения	Представлены результаты испытаний монофотонных датчиков.	20000	10000.32
10	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение бразования «Российский химико-технологический	7707072637	договор от 27.10.2021 №8418.21.15	до 15.12.23	образовательная организация высшего образования	1,2,3	3	3.3.9. Подготовка в 2023 г. специалистов по программе дополнительного профессионального	Подготовлено 95 человек по ДПО. Проведена конференция молодых исследователей.	2300	0

	университет им. Д.И. Менделеева"							образования «Синхротрон ные и нейтронные методы исследования конденсированных фаз» 3.3.10 Организация и проведение в 2023 г. международн ой конференции молодых исследователей и специалистов «Синхротрон ные и нейтронные методы исследования конденсированных фаз»			

Приложения:

1. Информационно-аналитическая справка о реализации исследовательской программы (проекта) за отчетный период

2. Отчетные документы по Плану-графику работ, выполненных в рамках реализации исследовательской программы (проекта), за отчётный период

Руководитель организации (уполномоченное лицо)

Заместитель директора — А.Э. Волошин

(должность) — *(фамилия, имя, отчество)*