

**Резюме проекта НИР, выполненного в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»**

Номер контракта: 16.518.11.7027

Тема: **Разработка новых методов исследования веществ и наноматериалов на пучках уникальной установки - ускорительного комплекса ФИАН «Пахра»**

Приоритетное направление: Индустрия наносистем

Критическая технология: Технологии диагностики наноматериалов и нанороботов

Период выполнения: 12.05.2011 – 16.11.2012

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Ключевые слова: поляризованное тормозное излучение, синхротронное излучение, электронный синхротрон, энергодисперсионный анализ

1. Цель исследования, разработки

1.1 Получение новых знаний и результатов в области:

- новых перспективных материалов, нанотехнологий с использованием методов активного физического воздействия релятивистскими электронами и синхротронным излучением на исследуемую среду,
- исследования и контроля структуры материалов с использованием электронных и фотонных пучков.

1.2 Обеспечение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, проводимых организациями Российской Федерации, с предоставлением им возможности использования методов научных исследований, разработанных или освоенных для уникальной установки, стенда (УСУ).

Предоставление научно-исследовательским организациям новых эффективных методов и средств проведения исследований свойств материалов на наномасштабах с использованием пучков релятивистских электронов и синхротронного излучения ускорительного комплекса ФИАН «Пахра».

1.3 Конкретная цель НИР состоит:

- в разработке новых методов изучения структуры и свойств конденсированных веществ на основе энергодисперсионного анализа рентгеновского поляризованного тормозного излучения релятивистских электронов,
- в осуществлении практических исследований веществ и наноматериалов на электронных и фотонных пучках уникальной установки - ускорительного комплекса ФИАН «Пахра» (с базовой установкой С-25Р – электронным синхротроном на энергию до 1.2 ГэВ),
- в создании и развитии установок и стендов для коллективного пользования, включая модернизацию существующей физической установки «Рентген-1»,

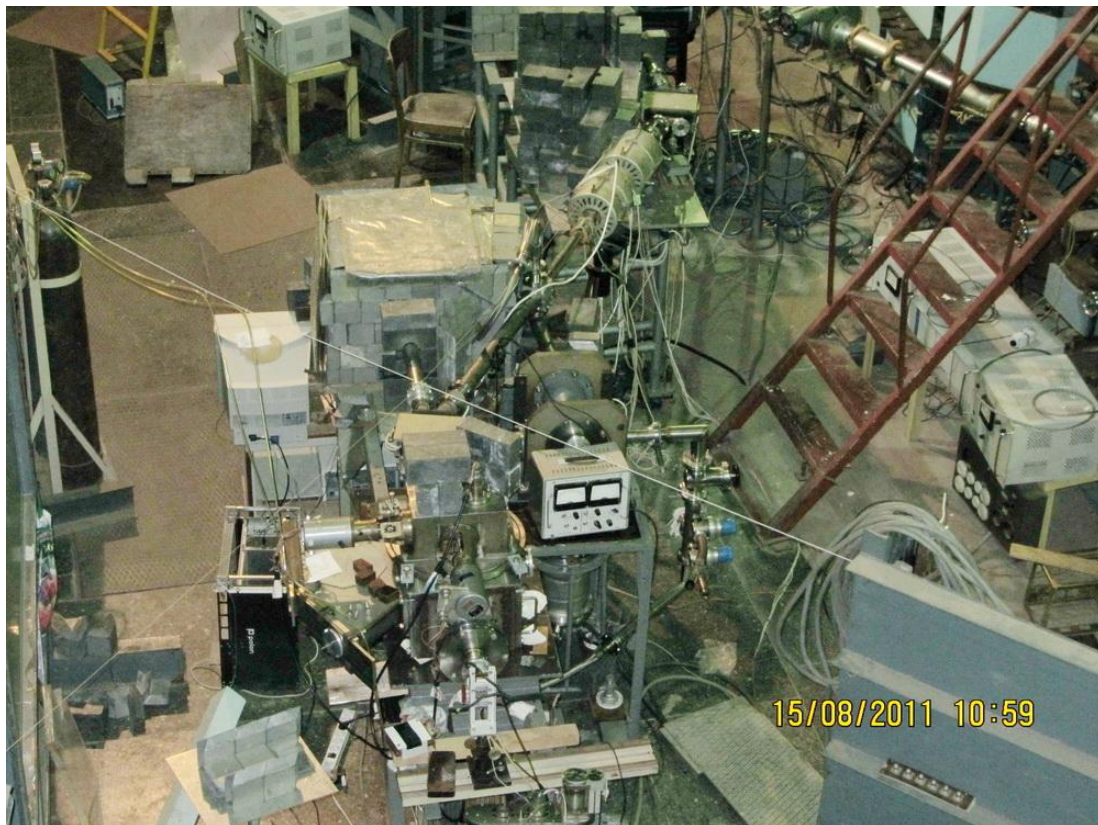
создание новой установки «Рентген-2» для исследований в области более высоких энергий, и создание станции синхротронного излучения в спектральной области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена,
- в подготовке специалистов и практическом обучении студентов и аспирантов.

Исследовательские работы будут проводиться на электронном пучке микротрона-инжектора с энергией от 7 до 12 МэВ, где смонтирована экспериментальная установка «Рентген-1», на выведенном из синхротрона электронном пучке с энергией от 200 до 500 МэВ, где будет создаваться установка «Рентген-2», и на пучке синхротронного излучения в области вакуумного ультрафиолета, где будет создаваться станция СИ.

2. Основные результаты проекта

2.1 На первом этапе проекта (12.05.2011 – 30.09.2011) развивалась методология исследований. Были заново изучены предпосылки успешного выполнения проекта – проведены патентные исследования, выполнен обзор и анализ литературы, касающейся теоретических и практических аспектов использования ПТИ при изучении структуры конденсированных веществ на наномасштабах. Эти исследования подтвердили обоснованность выбранного направления работы, а также необходимость использования УСУ для достижения поставленных целей.

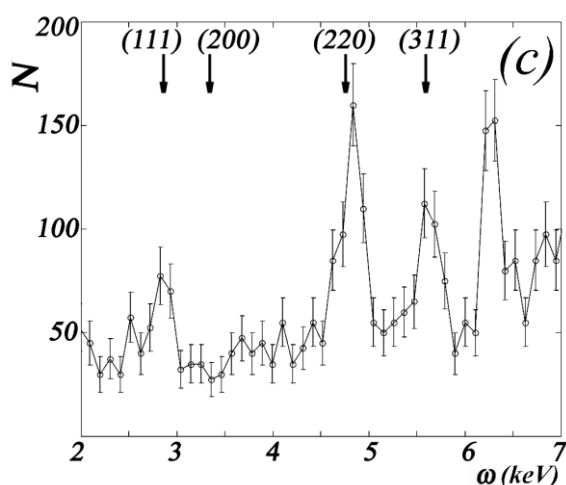
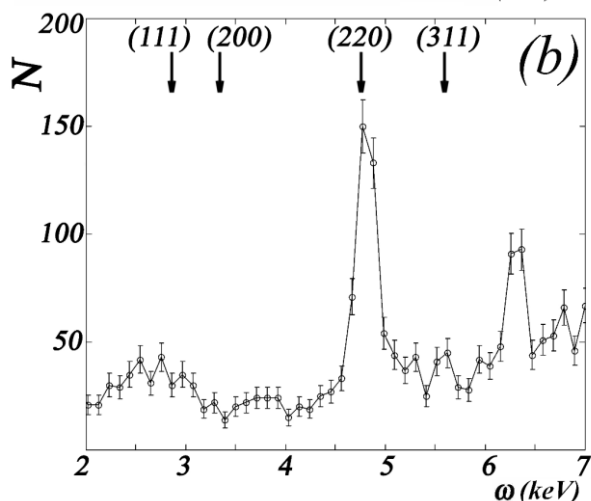
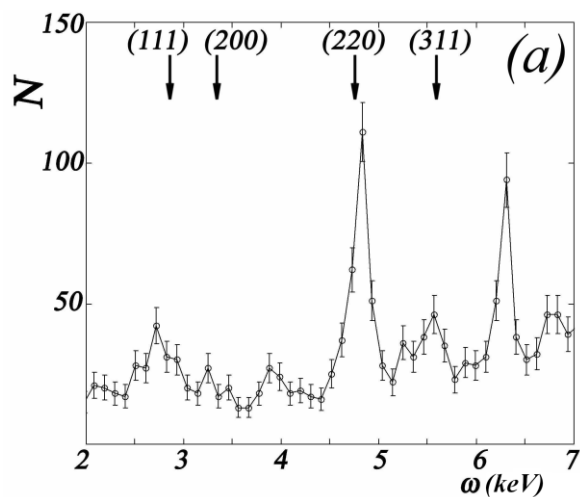
2.2. Модернизирована установка «Рентген-1», смонтированная на магнито-оптическом электронном канале, соединяющим установку с микротроном на энергию 7-12 МэВ (в зависимости от выбранной моды ускорения). Модернизация была направлена на получение возможности изучать обратное ПТИ (т.е. излучение под задними углами по отношению к электронному пучку). Согласно имеющимся теоретическим предсказаниям, полученным членами авторского коллектива, спектр такого обратного излучения является линейчатым с очень узкими пиками шириной несколько электрон-вольт, и он чрезвычайно чувствителен к атомной структуре вещества. Для изучения таких узких пиков используется рентгеновский монохроматор, который, однако, не может работать в условиях значительного фона, присутствующего вблизи микротрона и коллиматоров. С целью подавления фона была изменена геометрия установки – был изготовлен и установлен в электронный канал дополнительный магнит, позволивший пространственно удалить мишень от основного фонового потока и установить усиленную радиационную защиту. Была изготовлена и смонтирована дополнительная квадрупольная линза, позволяющая хорошо фокусировать пучок на мишени. Рентгеновский монохроматор был помещен в вакуумный бокс, расположенный значительно ближе к мишени. Гониометр, ориентирующий мишень по трем осям, был снабжен системой управления и контроля через компьютер. Предприняты меры по улучшению системы вакуумной откачки – установлен дополнительный форвакуумный насос, смонтированы новые вакуумные затворы, гибкие вакуумпроводы, измерители вакуума.



Модернизированная установка «Рентген-1» (август 2011 г.)

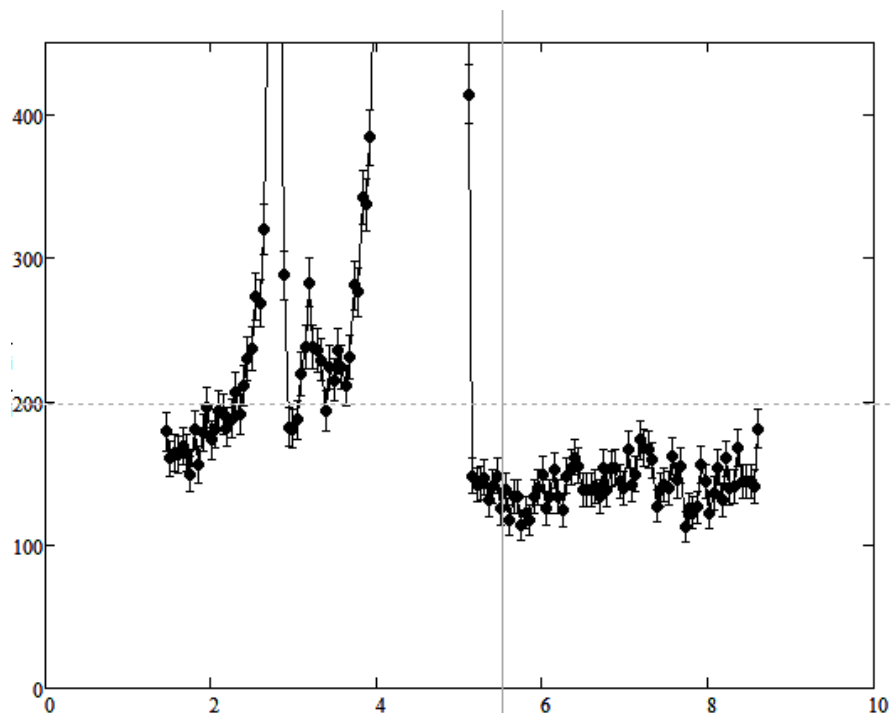
2.3. Подготовлен проект аналогичной установки «Рентген-2», которая будет размещаться на выведенном из синхротрона электронном пучке высоких энергий (до 500 МэВ). Эта установка позволит изучать явление ПТИ и его практическое использование для определения структуры конденсированных веществ в режиме особой узких спектральных пиков и высокого энергетического разрешения.

2.4. На втором этапе проекта (01.10.2011 – 15.12.2011) на модернизированной установке «Рентген-1» были закончены пуско-наладочные работы и проведены измерения рентгеновского ПТИ в геометрии обратного рассеяния («ПТИ назад») для ряда поликристаллических веществ – меди, алюминия, никеля. Измерения выполнялись с помощью кремний-литиевого детектора и рентгеновского монохроматора. Был выполнен теоретический анализ полученных данных, который показал хорошее согласие эксперимента и теории и тем самым подтвердил правильность теоретического фундамента развиваемой методологии ПТИ-диагностики конденсированных веществ. По результатам работы в журнале «Письма в ЖТФ» опубликована 1 статья.



Измеренные на установке «Рентген-1» спектры ПТИ назад из медной текстурированной мишени, полученные с кремний-литиевым детектором для угла строго назад (а) и близких углов (b и c).

2.5. На третьем этапе проекта (01.01.2012 – 30.06.2012) продолжались экспериментальные исследования веществ и наноматериалов (включая наноструктурированный титан) на модернизированной установке «Рентген-1». Продолжался анализ накопленных экспериментальных данных и проверки лежащей в его основе теории. Подготовлена методика определения структуры материалов на атомных и наномасштабах на основе ПТИ. По результатам работы в журнале “Physics Letters A” опубликована 1 статья.



Измеренный на установке «Рентген-1» спектр ПТИ для наноструктурированного титана.

Успешно продвигались работы, направленные на создание установки «Рентген-2», предназначенной для исследования процессов ПТИ в другом диапазоне энергий, чрезвычайно перспективном для прецизионных исследований атомной структуры веществ. Выполнены работы по оборудованию станции СИ на канале синхротронного излучения рентгеновским спектрометром-монохроматором.

2.6. На четвертом, заключительном этапе проекта (01.07.2012 – 16.11.2012) продолжались экспериментальные исследования веществ и наноматериалов на модернизированной установке «Рентген-1». Были выполнены дополнительные измерения спектра ПТИ на наноструктурированном титане при углах наблюдения ПТИ 75° . Эти измерения и теоретический анализ данных позволили объяснить загадочную особенность результатов с титаном, полученных на 3-м этапе работы, а именно отсутствие пиков в спектре ПТИ, предсказываемых теорией. Оказалось, что для титана имеет место перекрытие частых узких пиков в спектре, которое требует либо применения рентгеновских детекторов высокого энергетического разрешения, либо – как это было в контрольных опытах – изменения геометрии измерений и наблюдения ПТИ под другими углами, для которых перекрытие пиков не имеет места. Результаты измерений для наноструктурированного никеля вошли в статью, направленную в печать в журнал «Поверхность». Эта статья принята к печати и выйдет в свет в 2013 году.

Работы по созданию установки «Рентген-2» и монтажу электронного тракта электронов высоких энергий в основном были завершены и вышли на стадию пуско-наладочных работ.



Ускорительный зал: место ввода электронного канала в амбразуру экспериментального зала №1 и далее к установке «Рентген-2».

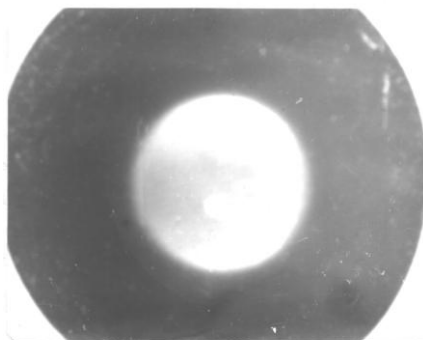


Экспериментальный зал №1: конечная часть электронного тракта (с квадрупольной линзой и пропорциональной камерой), подводящего электронный пучок высокой энергии к цилиндрическому вакуумному боксу, предназначенному для установки мишени на гониометре и рентгеновской детектирующей аппаратуры (лето 2012 г.)

Работы по созданию станции СИ на канале синхротронного излучения также вышли на стадию пуско-наладочных работ. На станции проведены тестовые и калибровочные измерения, в том числе с реальным пучком синхротронного излучения, генерируемым электронным синхротроном «Пахра».



Вид на конечную часть станции СИ (июль 2012 г.)



Фотография синхротронного излучения, достигающего выходного окна канала СИ (в месте установки рентгеновского спектрометра-монокроматора McPherson)

2.7. В целом план и график работ, предусмотренный госконтрактом, техническим заданием и календарным планом оказался успешно выполненным, а поставленные цели и показатели – достигнуты.

3. Назначение и область применения результатов проекта

Созданная и модернизированная установка «Рентген-1» в настоящее время фактически стала действующим лабораторным образцом нового прибора для исследований атомной структуры конденсированных веществ методом энергодисперсионного анализа рентгеновского ПТИ. В дальнейшем этот прибор будет использован для развития исследований структуры веществ и наноматериалов – в соответствии с календарным планом работы по проекту, а также в интересах сторонних организаций.

Сооружаемая аналогичная установка «Рентген-2» на пучке электронов более высоких энергий позволит существенно расширить диапазон применения и точность методов исследования веществ на атомных масштабах, основанных на ПТИ.

Успешное завершение работ по сооружению действующей станции СИ и оснащению её рентгеновской аппаратурой позволит развернуть на базе синхротронного канала ускорительного комплекса ФИАН «Пахра» важные практические исследования в области индустрии наносистем, биологии, медицины.

Публикации:

1. Письма в ЖТФ, 2012, том 38, вып. 6, с. 83-89.
В.И. Алексеев, К.А. Вохмянина, А.Н. Елисеев, П.Н. Жукова, А.С. Кубанкин, Р.М. Нажмудинов, Н.Н. Насонов, В.В. Полянский, В.И. Сергиенко.
«Обнаружение когерентных пиков поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в поликристалле в геометрии обратного рассеяния»
2. Physics Letters A 376 (2012) p. 1506–1508.
Т.Н. Le, N.N. Nasonov.
«On relativistic electron bremsstrahlung in thin targets»
3. Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013, №3, с. 88-90.
Алексеев В.И., Иррибарра Э.Ф., Кубанкин А.С., Нажмудинов Р.М., Насонов Н.Н., Полянский В.В., Сергиенко В.И.
«Экспериментальное исследование поляризационного тормозного излучения в мелкозернистых поликристаллах»
4. Краткие сообщения по физике. 2013. Т. 40, № 4, с. 3-7.
П.Н. Жукова, Т.Х. Ли, В.А. Насонова, Н.Н. Насонов, В.И. Сергиенко.
«Об одной возможности определения положения атома в элементарной ячейке кристалла»