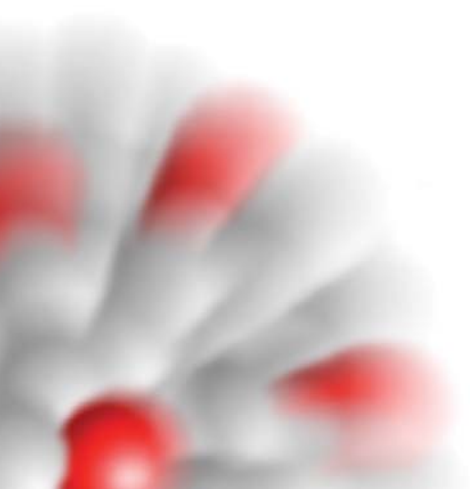


ИССЛЕДОВАНИЯ **наносистем и материалов** с использованием синхротронного излучения и нейтронов **в РОССИИ**

современное состояние
и перспективы развития



Содержание

Предисловие.....	2
1. Возможности синхротронного излучения и нейтронов	4
2. Перспективы использования синхротронного излучения и нейтронов в исследованиях наносистем и материалов	8
2.1. Синхротронные исследования	9
2.2. Нейтронные исследования.....	26
3. Источники синхротронного излучения и нейтронов: российский потенциал	34
3.1. Источники синхротронного излучения	35
3.2. Источники нейтронов	45
4. Стратегия развития	59
Заключение.....	66

Предисловие

Прогресс в развитии наносистем и материалов в XXI веке может привести к значительному изменению окружающего нас мира, сопоставимому с открытием электричества и антибиотиков в XX веке и Интернета в современном обществе. Разработка новых наносистем, материалов и передовых технологий на их основе – универсальный инструмент переустройства мира, который позволит манипулировать веществом на уровне, равноценном возможностям компьютера манипулировать информацией.

Нанотехнологии, основанные на применении новых наносистем и материалов, имеют большое значение для большинства, если не для всех отраслей промышленности. Ключевыми областями их применения являются медицина, энергетика, окружающая среда, сельское хозяйство, информационные технологии, приборы и аппаратура, новые материалы, технологическая безопасность.

Следует подчеркнуть междисциплинарный характер нанотехнологий как важнейший аспект на пути к новой технологической революции. Развитие нанотехнологий характеризуется широким взаимопроникновением идей и разработок, интеграцией материалов, методов и процессов. Происходит конвергенция неорганических, органических и биологических объектов, что позволяет создавать принципиально новые материалы, микромеханизмы, биокомпьютеры, интеллектуальные материалы, новые типы медицинских технологий.

Ускоренное развитие работ в области наносистем и материалов призвано обеспечить реализацию стратегических национальных приоритетов Российской Федерации, изложенных в Основах политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу: повышение качества жизни населения, достижение экономического роста, развитие фундаментальной науки, образования и культуры, обеспечение экономической и национальной безопасности страны.

Развитие нанонауки и нанотехнологий требует совершенствования физических основ экспериментальной базы и создания новых установок для проведения научных исследований. Важнейшее значение для решения вышепоставленных задач имеет комплексное применение взаимодополняющих методов рассеяния синхротронного излучения и нейтронов, позволяющих получать наиболее детальную информацию о свойствах наносистем и материалов на микроскопическом уровне. Главной целью такого комплексного подхода является установление взаимосвязи между структурой объектов на

атомном уровне и их физическими и технологическими свойствами, между биологическими функциями со структурными изменениями и движениями молекул в живых организмах. Огромные возможности для достижения этой цели дает использование синхротронного излучения. Важным дополнительным методом является рассеяние нейтронов, а в ряде случаев благодаря уникальным характеристикам нейтронов оно оказывается единственно возможным средством получения информации о структуре.

Согласно общемировой тенденции на базе нейтронных и синхротронных центров появляются междисциплинарные объединения по нанотехнологиям – например, в Аргонской национальной лаборатории (США), Институте Пауля Шеррера (Швейцария), Институте Лауэ–Ланжевена и Европейском центре синхротронного излучения (Франция).

В этой сфере у нас имеется много научных приоритетов, но мы недопустимо отстаем в техническом оснащении. Необходимо вывести экспериментальную базу на мировой уровень по оснащению и обеспечить широкое ее использование физиками, химиками, материаловедцами, биологами в рамках единой программы развития нанонауки, нанотехнологии и наноинженерии.

В данном буклете представлено краткое описание возможностей применения методов рассеяния синхротронного излучения и нейтронов для решения наиболее актуальных проблем современного материаловедения, связанных с перспективными нанотехнологиями, а также современное состояние и перспективы развития источников в России.

Буклет подготовлен Научным советом Роснауки по использованию синхротронного излучения и нейтронов в нанонауках и материаловедении при участии ведущих синхротронных и нейтронных центров Российской Федерации.

Председатель Научного совета Роснауки
по использованию синхротронного излучения
и нейтронов в нанонауках и материаловедении

Директор Российского научного центра
«Курчатовский институт»
член-корреспондент РАН

М.В. Ковальчук

май 2006 г., Москва

1

1. Возможности синхротронного излучения и нейтронов

Синхротронное излучение

Синхротронное излучение (СИ) представляет собой протяженный спектр излучения с энергией от нескольких миллиэлектронвольт (красная часть спектра) до сотен килоэлектронвольт (жесткое рентгеновское излучение), которое испускают релятивистские электроны в магнитном поле в накопителях электронов.

СИ обладает уникальными характеристиками, которые используются в исследованиях наноструктур:

- высокая яркость излучения;
- возможность перестройки по спектру, которая позволяет на одном накопителе проводить исследования практически всех свойств наноструктур;
- поляризация;
- возможность получать пучки рентгеновского излучения нанометрового размера;
- частичная и полная пространственная когерентность излучения;
- строгая временная периодичность.

Вышеперечисленные свойства (возможности) СИ позволяют широким фронтом проводить исследования наноструктурированных объектов. Кроме того, пучки СИ позволяют реализовать уникальные технологические процессы: двумерная литография с разрешением на уровне 100 нм, трехмерная LIGA-технология, позволяющая получать объемные структуры для изготовления микромашин, микрооптики.

Терагерцевое излучение

В последнее десятилетие наблюдается резкий рост числа фундаментальных и прикладных работ в области генерации и применения излучения в интервале длин волн от 30 мкм до 0,3 мм, что соответствует частотному диапазону 10 – 1 ТГц. Эта область лежит между фотоникой и электроникой, перекрываясь с длинноволновым далеким инфракрасным излучением и высокочастотными миллиметровыми волнами. За последние годы появился целый ряд новых типов источников терагерцевого излучения от милливаттных генераторов субпикосекундных импульсов широкополосного излучения на основе фемтосекундных лазеров до лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), генерирующих перестраиваемое узкополосное когерентное излучение со средней мощностью до сотен ватт.

Интерес к терагерцевому излучению обусловлен следующими его свойствами:

- неионизирующий характер излучения (энергия фотонов 0,04 – 0,004 эВ);

- излучение хорошо проходит через мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния ($1/\lambda^4$);
- волновой диапазон излучения соответствует области вращательных спектров молекул, колебаний биологически важных коллективных мод ДНК и белков, колебаний твердотельной плазмы;
- энергетический диапазон соответствует энергии водородных связей и вандерваальсовских сил межмолекулярного взаимодействия;
- энергия фотонов терагерцового излучения лежит в области энергетической щели сверхпроводников.

До недавнего времени источники терагерцового излучения имелись в небольших количествах в физических лабораториях и почти полностью отсутствовали в химических, биологических и медицинских лабораториях. Создание лазеров на свободных электронах как источников терагерцового излучения позволило образовать на их базе центры коллективного пользования в США, Голландии и Японии, которые используются учеными разных специальностей. Созданы национальные программы использования терагерцового излучения в США, Японии и Европе.

Нейтроны

Благодаря уникальным характеристикам нейтронов, для ряда исследований рассеяние нейтронов оказывается единственно возможным методом, в других случаях оно служит незаменимым дополнением к рентгеновским методам.

- Нейтроны взаимодействуют с ядрами, а не с электронными оболочками. Длина рассеяния может сильно отличаться для изотопов одного элемента. Отсюда следует мощный метод изотопного контраста, а также возможность видеть легкие атомы на фоне тяжелых. Особенно ярко возможности нейтронографии проявляются в системах, содержащих водород, таких как полимеры, биологические системы, органические и водные растворы.
- Нейтроны имеют собственный магнитный момент. Поэтому нейтронография – прямой метод диагностики магнитных структур как в объеме, так и на поверхности. Особенно эффективны пучки поляризованных нейтронов.
- Нейтроны взаимодействуют с веществом слабо, поэтому они не разрушают даже деликатные биологические системы и могут глубоко проникать в образец, что важно при изучении объемных свойств.

Благодаря высокой проникающей способности нейтронов нейтронография имеет широкие возможности использования непосредственно в эксперименте дополнительных устройств, таких как камеры высокого давления, печи, сложные криостаты, электромагниты.

Наиболее актуальными направлениями для исследований с помощью синхротронного излучения и нейтронов являются:

- наноматериалы;
- полимеры и эластомеры;
- кристаллические материалы со специальными свойствами;
- композиционные и керамические материалы;
- молекулярная биология и фармакология;
- инженерная диагностика;
- медицинская диагностика;
- геофизика и науки о Земле.

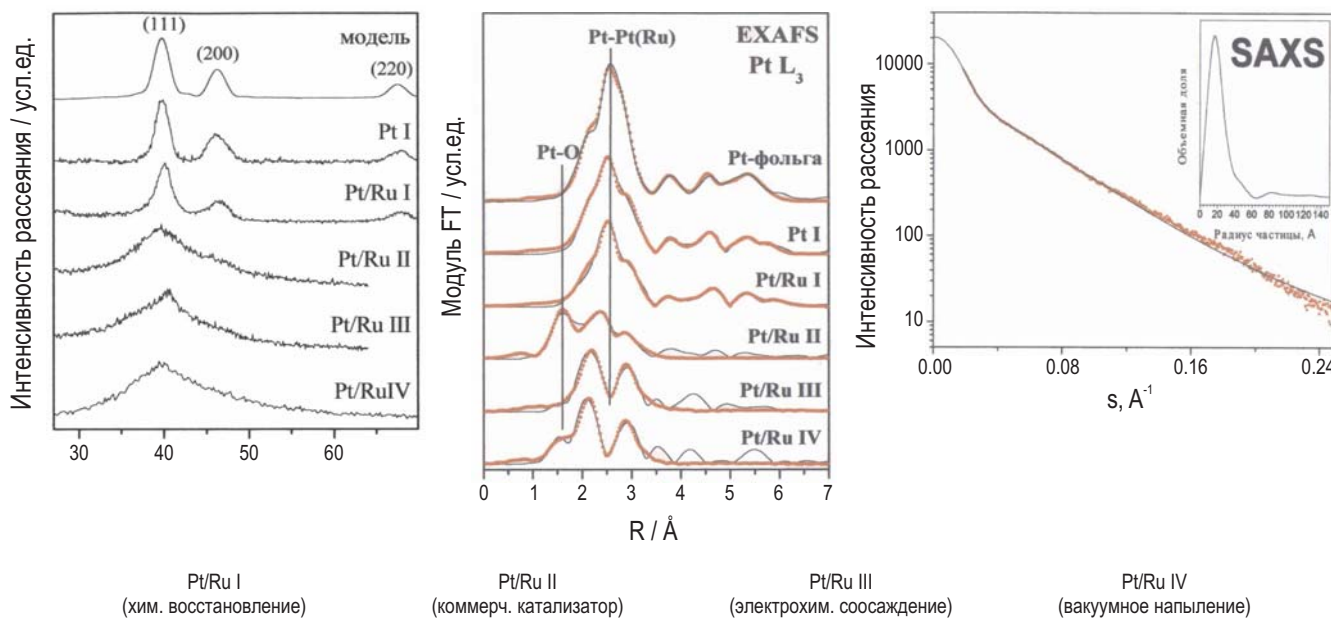
Россия в настоящее время располагает достаточным научно-технологическим заделом и кадровым потенциалом для всестороннего исследования наносистем и материалов методами рассеяния синхротронного излучения и нейтронов, направленного на реализацию поставленных задач.

2. Перспективы использования синхротронного излучения и нейтронов в исследованиях наносистем и материалов

2.1. Синхротронные исследования Наноматериалы

Нанокластеры металлов имеют большое соотношение поверхность/объем, что обуславливает широкое применение таких кластеров в качестве катализаторов. Использование в этом качестве металлов платиновой группы лежит в основе большинства технологий, используемых в быстро развивающейся в последнее время водородной энергетике. В частности, смешанно-металлические Pt/Ru кластеры размером 1–5 нм в полимерных матрицах находят применение в качестве электродных материалов в топливных элементах окисления метанола. Эффективность и стоимость таких элементов существенно зависят от размерных и структурных характеристик наночастиц, определяемых технологией их синтеза. Эти характеристики достаточно подробно могут быть определены методами рентгеновской дифракции, EXAFS-спектроскопии и малоуглового рассеяния синхротронного излучения.

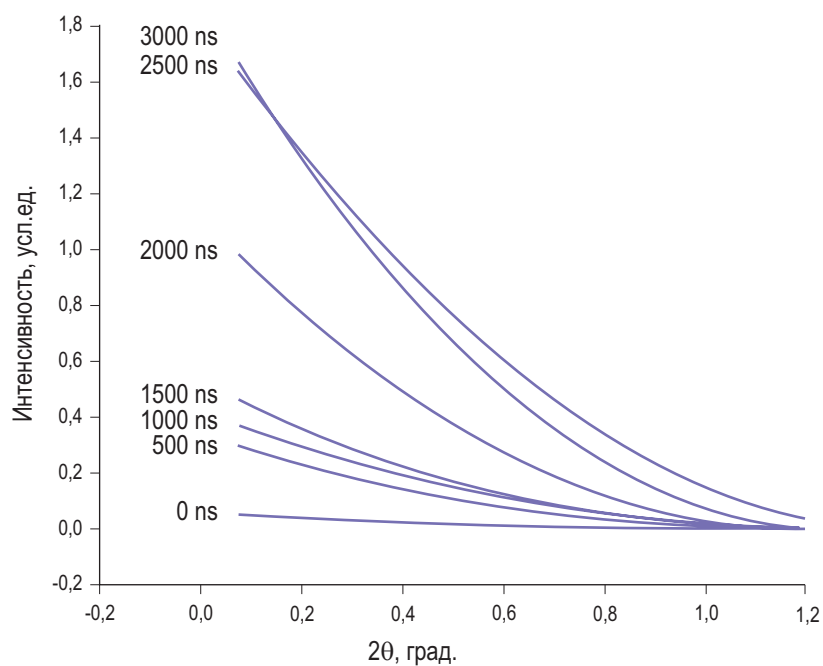
Данные рентгеновской дифракции (слева), EXAFS-спектроскопии на L_3 -крае Pt (в центре) и малоуглового рентгеновского рассеяния (справа) для прототипов электродных материалов метанольных топливных элементов. Внизу: схематическое изображение структуры наночастиц, полученных различными методами



Ультрадисперсные алмазы (УДА)

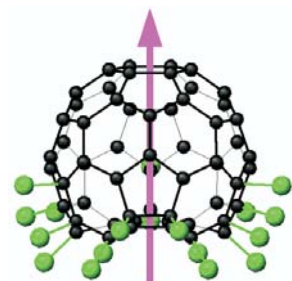
— синтетические алмазы, которые получают детонационным синтезом при воздействии энергии взрыва.

ФГУП ФНПЦ "Алтай" является автором проекта промышленного производства ультрадисперсных алмазов. Уникальность продукта УДА состоит в сочетании алмазной структуры ядра, алмазной твердости, химической инертности, с одной стороны, и наноразмерности частиц, округлой формы, развитой и активной поверхности — с другой.

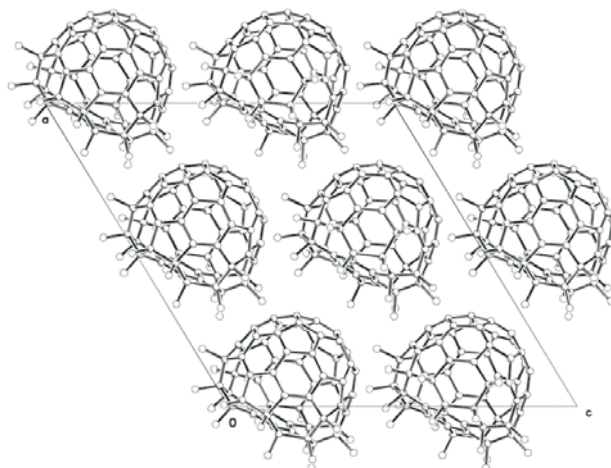


Динамика изменения малоуглового рассеяния синхротронного излучения на системе тротил-гексоген во время взрыва. Рост интенсивности свидетельствует об образовании зародышей алмазов и их росте.

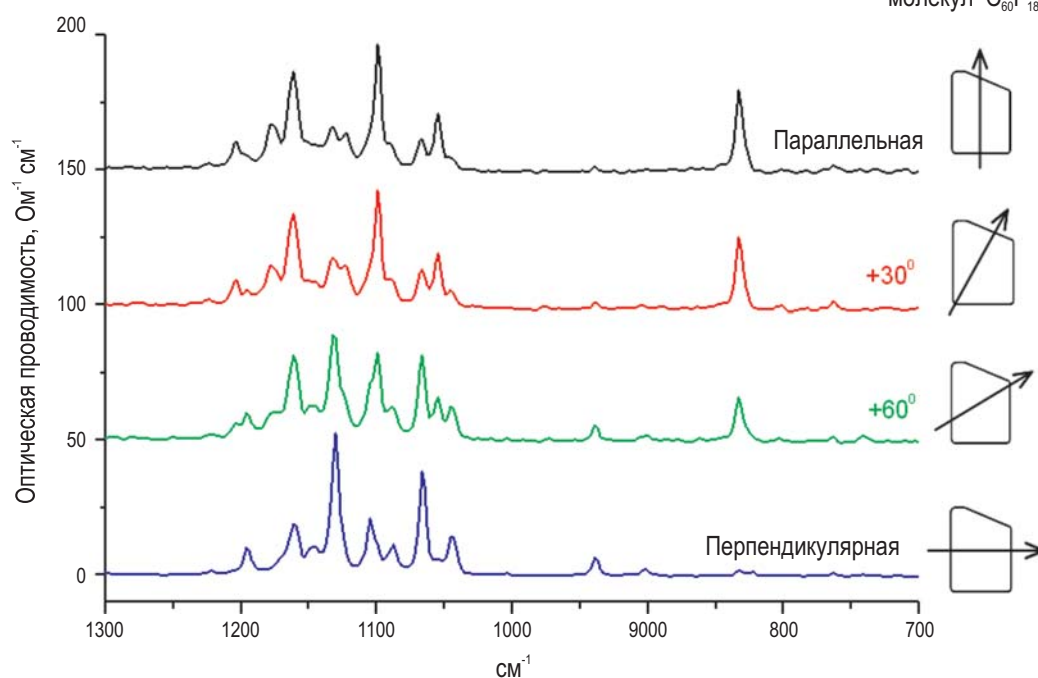
Фуллерены – наноразмерные частицы, которые благодаря уникальной структуре и свойствам могут быть использованы как основа для создания новых материалов. Молекула фторированного фуллерена $C_{60}F_{18}$ размером 1 нм имеет несимметричную структуру и обладает собственным электрическим дипольным моментом, поэтому может проявлять сегнето- или пьезоэлектрические свойства. Существует потенциальная возможность выращивания монокристаллических тонких пленок со строго заданной ориентацией дипольного момента молекул, причем упорядоченное состояние будет сохраняться при высоких (более 100°C) температурах.



Молекула $C_{60}F_{18}$



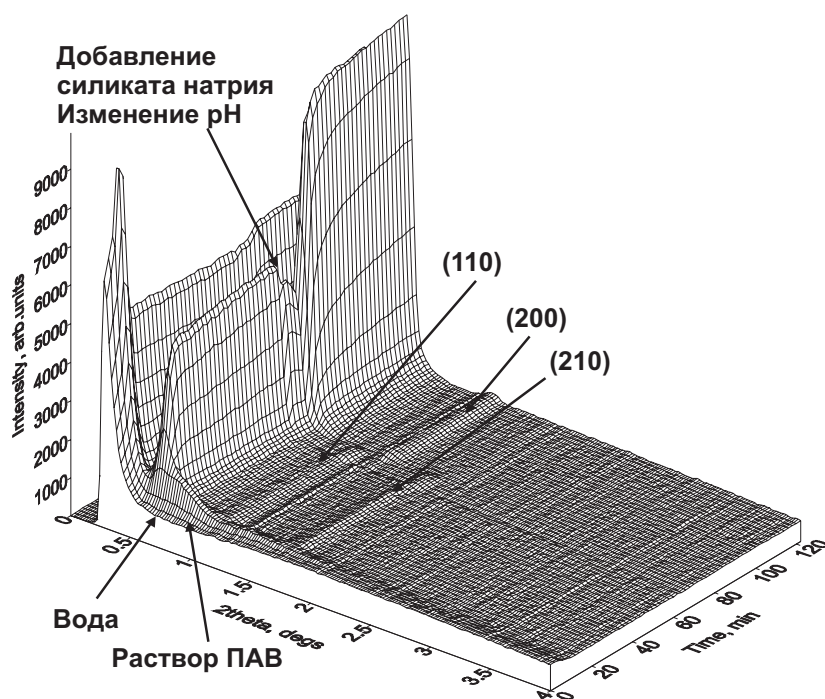
Система упорядоченных дипольных молекул $C_{60}F_{18}$



ИК-спектры $C_{60}F_{18}$

Наноструктурированные мезофазные

силикатные материалы впервые были синтезированы в 1992 г. и являются перспективными для использования в различных областях науки и технологии. Эти материалы демонстрируют упорядочение структурных единиц (мезопор) в нанометровом диапазоне при возможном отсутствии дальнего порядка в атомной структуре силиката. Характер упорядочения и размер мезопор зависят от условий синтеза. Значения удельной поверхности и объема мезопор лежат в интервале 700-1200 м²/г и 0.5-1.0 см³/г соответственно, что делает такие материалы привлекательными с точки зрения химии, катализа и адсорбции.



Синтез и структура мезоструктурированного силиката типа SBA-15, двумерно-гексагональная упаковка, диаметр мезопор ~10 нм, толщина стенки ~3 нм

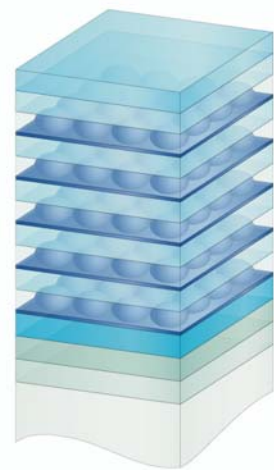
Низкоразмерные наноструктуры

(структуры с квантовыми ямами, точками и нитями) широко используются при создании новых квантовых устройств и систем для опто- и наноэлектроники, измерительной техники, информационных технологий нового поколения, средств связи и пр. Важную роль в проблеме конструирования наноструктур с заданными свойствами играет развитие адекватных методов диагностики таких объектов.

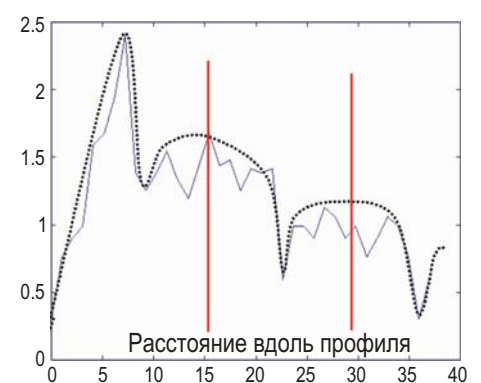
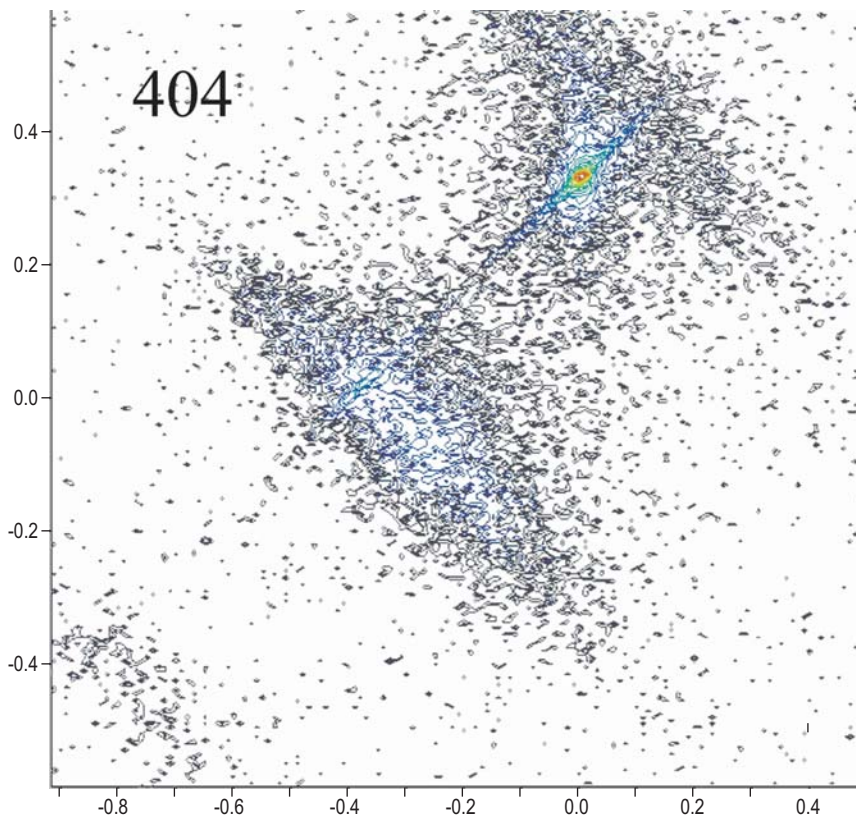
Одним из перспективных неразрушающих методов исследования низкоразмерных наноструктур является метод отображения обратного пространства (Reciprocal Space Mapping) с использованием синхротронного излучения, дающий информацию о размерах, форме, полях упругих деформаций, корреляционных параметрах и составе ансамблей квантовых точек.



Фотодиодные проекционные системы



Гетероструктуры с квантовыми точками



Сверхрешетка на наноструктуре с квантовыми точками (InAs/GaAs). RSM-анализ диффузного рассеяния вблизи сателлитного пика 0-порядка сверхрешетки позволяет определить латеральную корреляционную длину в системе квантовых точек

Твердотельные наноразмерные гетероструктуры

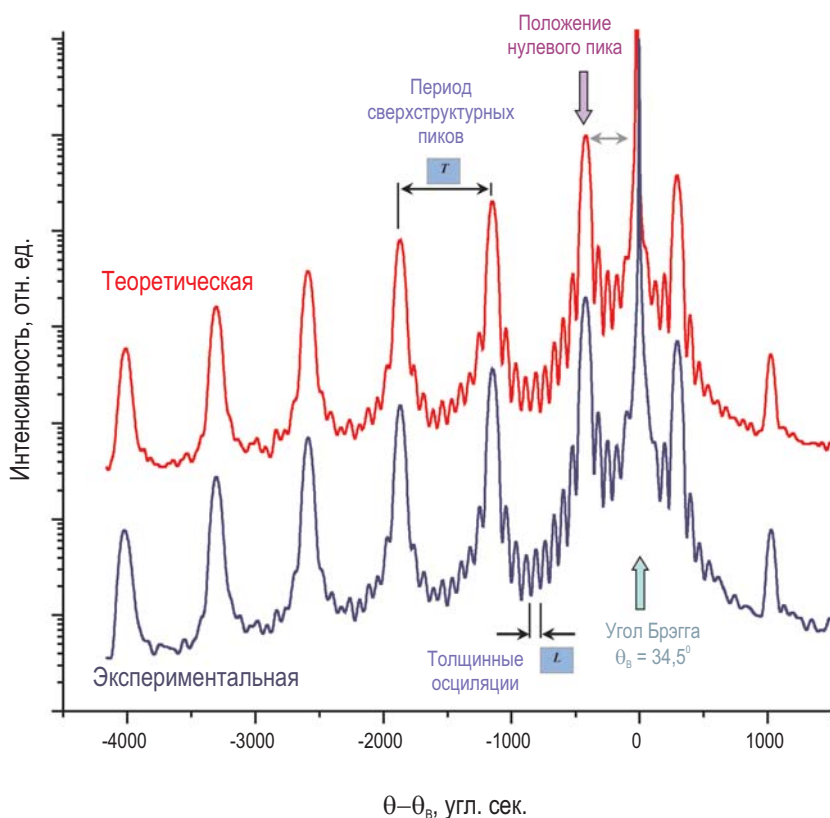
В последние годы было продемонстрировано много интересных возможностей применения гетероструктур в различных полупроводниковых приборах нано- и оптоэлектроники (мощные СВЧ-транзисторы, НЕМТ-транзисторы, фотодетекторы, лазеры и др.). Получение высококачественных гетероструктур, а следовательно, и приборов с заданными параметрами, невозможно без тщательного контроля процессов роста. Одним из перспективных методов исследования и контроля процессов роста таких гетероструктур является метод высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии с использованием синхротронного излучения, позволяющий получать информацию о периодичности структуры, составе, толщине слоя и присутствии дефектов.



Привод CD-ROM



Лазерные светоизлучающие диоды

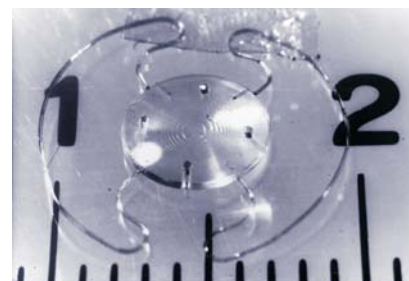


Кривая дифракционного отражения от 10-периодной сверхрешетки с квантовыми ямами $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, применяемой в качестве активной области каскадного лазера. Анализ кривой позволяет определить толщину выращенных слоев, установить состав слоев и их кристалличность

Глубокая рентгеновская литография является первой операцией в ЛИГА-процессе (литография, гальваника, формовка), направленной на изготовление объемных микроструктур с поперечными размерами от 0.1 мкм и более и высотой до нескольких миллиметров. Наиболее полно раскрыть возможности глубокой рентгеновской литографии позволяет использование источника синхротронного излучения.

Области применения технологии:

- Микромеханика: датчики ускорения, давления, микромоторы, микрошестерни.
- Микрооптика: микроспектрометры для видимого света, разъемы для волоконной оптики, переключатели.
- Микрофлюидика: реакторы для смешивания жидкостей и газов, дозирующие устройства, теплообменники, насосы.



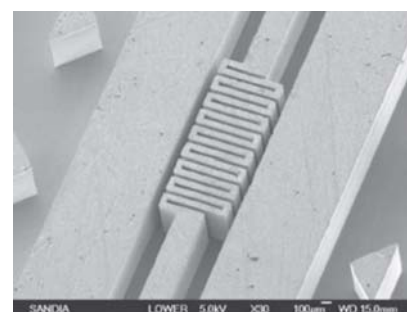
Бифокальный искусственный хрусталик глаза, изготовленный методом глубокой рентгеновской литографии на пучке синхротронного излучения



Микрореактор для смешивания двух жидкостей, состоящий из насосов и теплообменника



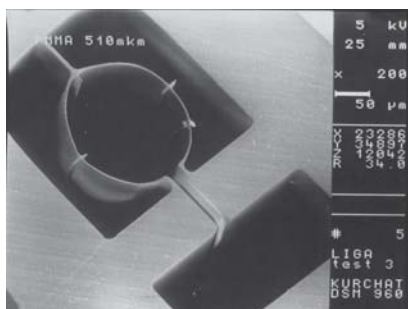
Шаговый двигатель



Фрагмент волновода



Фрагмент смесителя



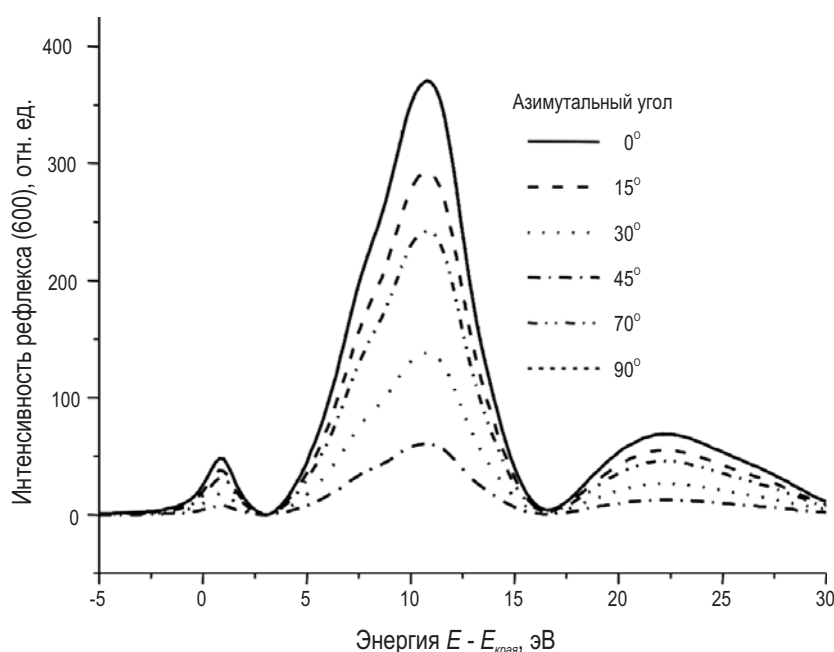
Датчик ускорения. Вид после экспонирования и проявления



Микротурбина.
Диаметр ротора 140 мкм

Кристаллические материалы со специальными свойствами

Ферромагнитные материалы на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) широко используются в магнитозаписывающих устройствах, в системах передачи и преобразования акустической энергии как материал для твердотельных лазеров. ЖИГ является перспективным материалом в широкополосных коммуникационных и радарных системах как микроволновой прерыватель или фильтр, обладающий высокой скоростью переключения. Весьма перспективным является использование ЖИГ с частичным замещением атомов (например, с замещением атомов иттрия атомами висмута) для создания широкополосных магнитооптических световых модуляторов в диапазоне 1МГц-1,8 ГГц. **Резонансная дифракция синхротронного излучения** позволяет точно определить распределение замещающих атомов по кристаллографическим позициям, а также изучить особенности электронных состояний в веществе.



Перестраиваемый
ЖИГ-осциллятор



Широкополосные
микроволновые фильтры

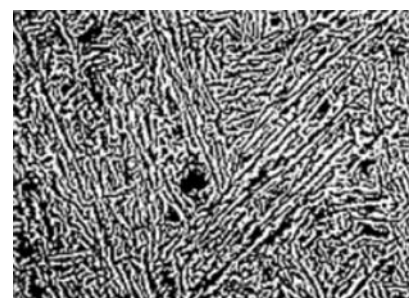
Энергетический спектр "запрещенного" рефлекса (600) в железо-иттриевом гранате, соответствующий резонансному рассеянию атомами железа в позиции 24(d)

Наночастицы – центры кристаллизации

В настоящее время для повышения механических и эксплуатационных свойств конструкционных материалов из стали и сплавов применяют дорогостоящие легирующие металлы в количестве до десятков процентов по массе от выплавляемого металла. Исследования показали, что наиболее эффективным и экономически выгодным способом повышения характеристик литого металла является применение нанопорошков тугоплавких соединений (оксидов, карбидов, боридов и др.), инициирующих кристаллизацию. Специально подготовленные перед введением в расплав, они равномерно распределяются в его объеме и служат затравками для образования твердой фазы, создавая локальные переохлаждения и условия для объемной кристаллизации и препятствуя росту столбчатых дендритов, что приводит к измельчению макро- и микрозерна. Реализация этого метода позволит достигнуть значительной экономии остродефицитных легирующих элементов.



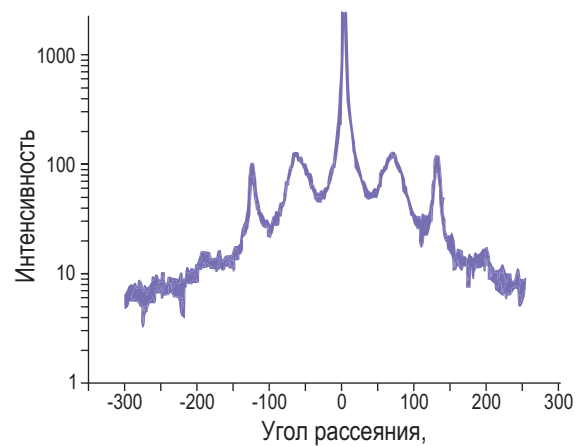
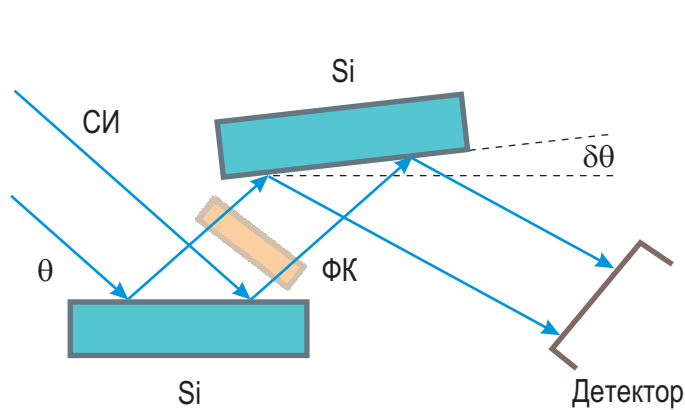
а x 500



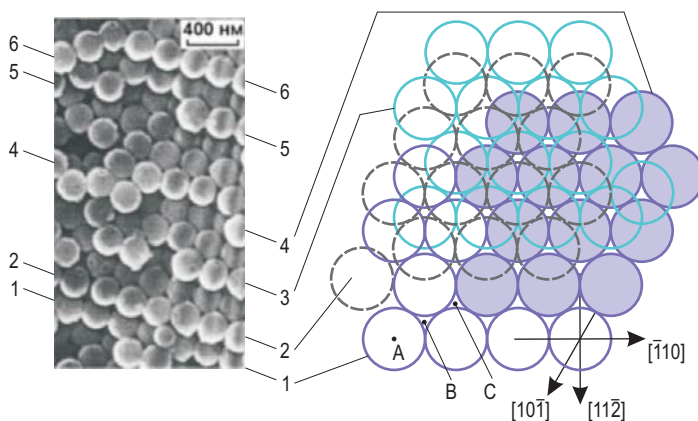
б x 500

Микроструктура стали,
кристаллизовавшейся без (а) и при
введении нанопорошка в расплав (б)

Фотонные кристаллы — материалы с периодической трехмерной диэлектрической структурой — представляют огромный интерес для построения лазеров нового типа, оптических компьютеров, а также хранения и передачи информации.



Спектр малоуглового рассеяния рентгеновского излучения в опаловой матрице



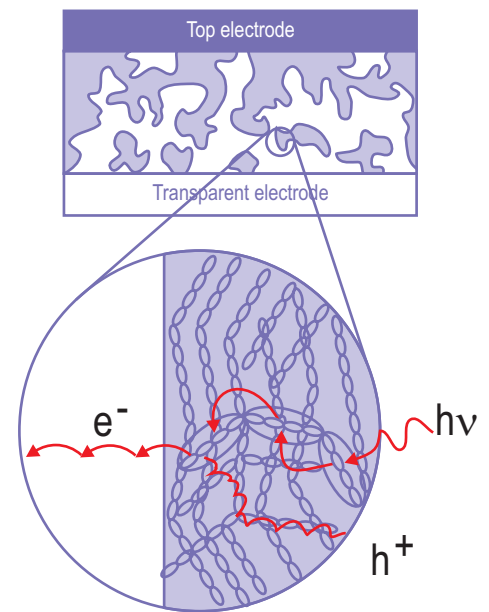
Структура опаловой матрицы в электронном микроскопе (слева) и ее схематичное изображение

Дифракционные эффекты при рассеянии коротковолнового излучения с длиной волны около 0,1 нм на периодических опаловых структурах с периодом порядка 500 нм должны быть сосредоточены в области исключительно малых углов рассеяния порядка нескольких десятков угловых секунд. Для наблюдения дифракции на фотонных кристаллах используется методика двухкристального спектрометра с секундным угловым разрешением.

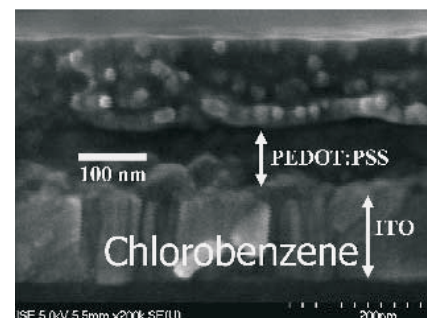
Композиционные и керамические материалы

Современные полимерные композиционные

материалы (ПКМ) на основе полисопряженных полимеров и фуллеренов (производных фуллеренов) представляют широкие возможности для создания фотовольтаических материалов. В таких ПКМ возникает чрезвычайно обширная граница раздела фаз, достаточная для эффективного фотоиндуцированного разделения зарядов. Если концентрации донорного и акцепторного компонентов подобраны должным образом, то весь объем ПКМ пронизывают каналы донора и акцептора, некое подобие взаимопроникающих трехмерных сетей. Наиболее часто используемым акцептором в солнечных элементах типа “bulk heterojunction” является 1-(3-метоксикарбонил)пропил-1-фенил[6,6]-C₆₀ (PCBM), который обеспечивает эффективную работу батарей в комбинации с рядом полимеров. Дизайн фотоактивного слоя с использованием в качестве акцептора комплексов фуллерена и его производных определяет свойства фотовольтаических материалов в зависимости от пространственного распределения частиц внутри полимера, которое эффективно исследуется методами рассеяния нейтронов и синхротронного излучения.



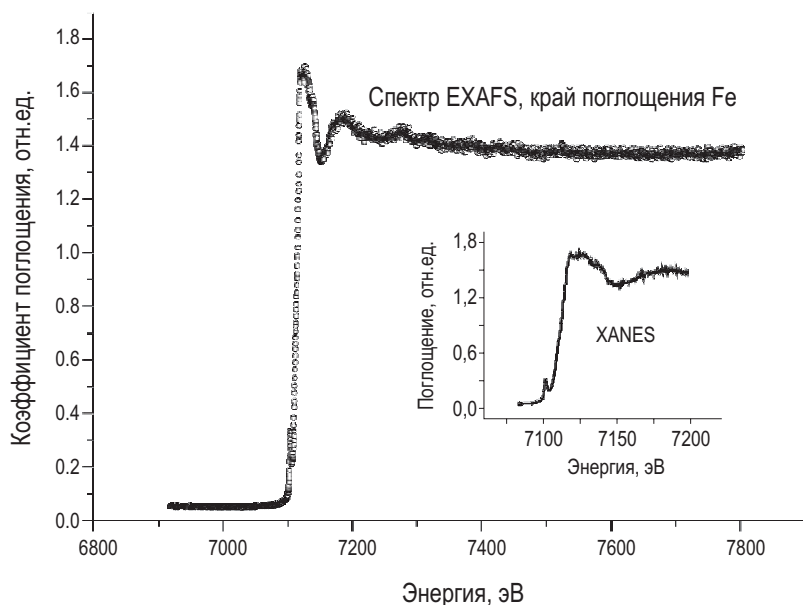
Модель структуры активного слоя батареи типа “bulk heterojunction”



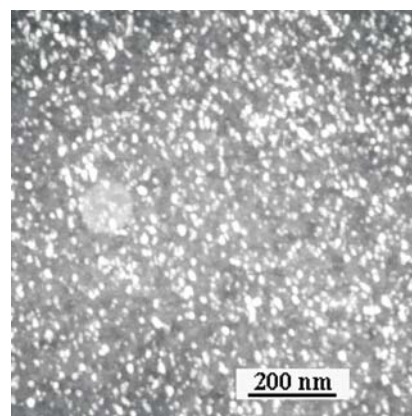
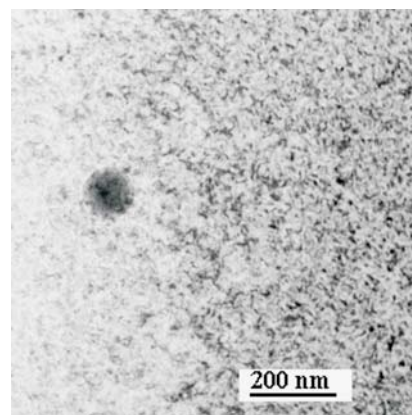
Микрофотография солнечной батареи в поперечном разрезе. Более светлые “зерна” соответствуют фазе донора, более темные — акцептору PCBM

Инженерная диагностика

Непрерывный спектр синхротронного излучения дает широкие возможности для исследования атомного упорядочения в конструкционных материалах методами **EXAFS-спектроскопии**. Метастабильные сплавы с трехмерной кристаллической наноструктурой имеют хорошую перспективу применения для конструкционных материалов реакторов на быстрых нейтронах. Синхротронное излучение используется для изучения механизмов формирования наноструктур на основе кластеров ближнего упорядочения в качестве ловушек точечных радиационных дефектов.



EXAFS-спектр вблизи К-края Fe

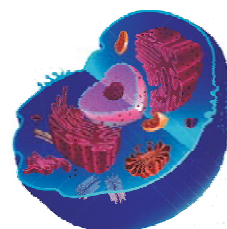


Светло (а)- и темнопольное (б) изображение доменов дальнего упорядочения в сплавах системы никель-хром

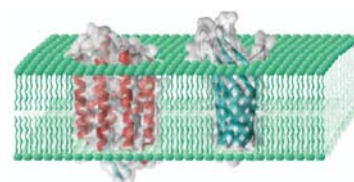
EXAFS-спектроскопия необходима для детального исследования ближнего упорядочения и расслоения в сплавах систем Fe-Cr, V-Ti-Cr, Ni-Cr.

Молекулярная биология и фармакология

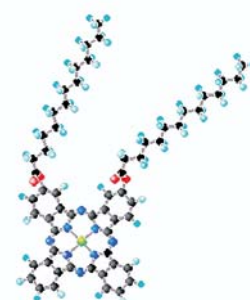
Исследования белково-липидных пленок на поверхности жидкой субфазы, когда не нарушается нативная конформация белковых молекул, а следовательно, сохраняются их биологические функции, приобретают особую актуальность для фундаментальных и прикладных исследований в области биологии и медицины. Это дает принципиальную возможность моделировать различные биофизические и биохимические процессы, протекающие в биологически активных мембранах живых клеток. Особый интерес для изучения структурно-функционального состояния белково-липидных мембранных моделей на жидкой субфазе представляют спектрально-селективные структурные методики, такие как **рентгенофлуоресцентный метод в области полного внешнего отражения**. Такой подход позволяет получить уникальную информацию о структурной организации и композиционном составе моделей клеточных мембран в физиологических условиях и при патологическом воздействии на клетку.



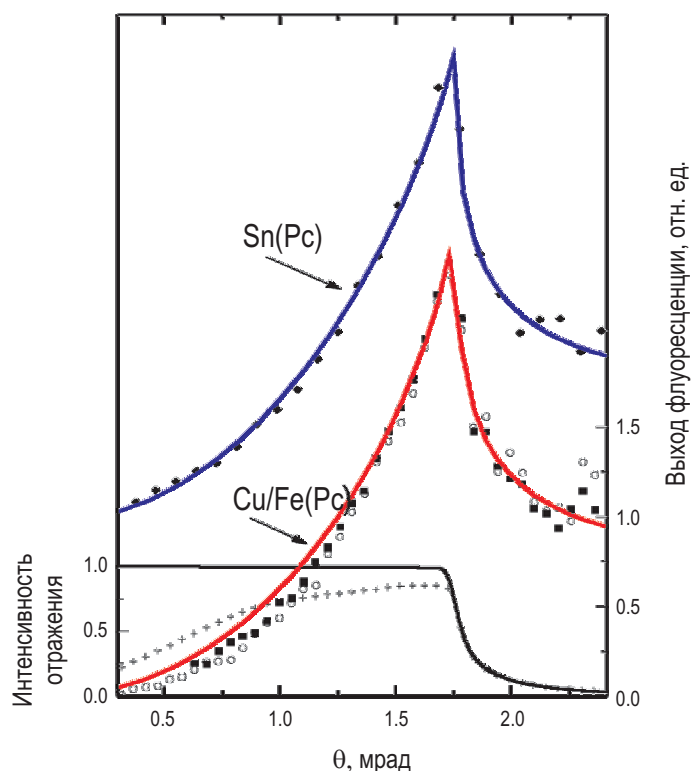
Модель строения клетки



Модель строения клеточной мембраны



Модель молекулы фталоцианина



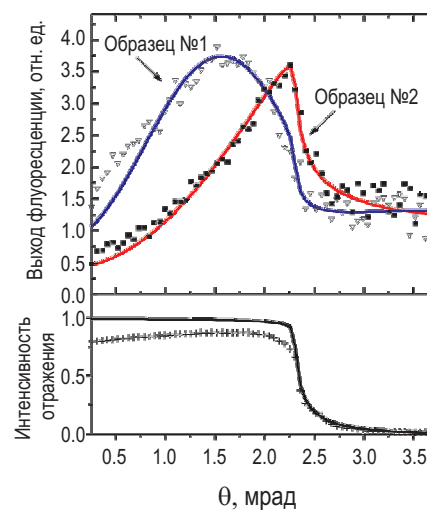
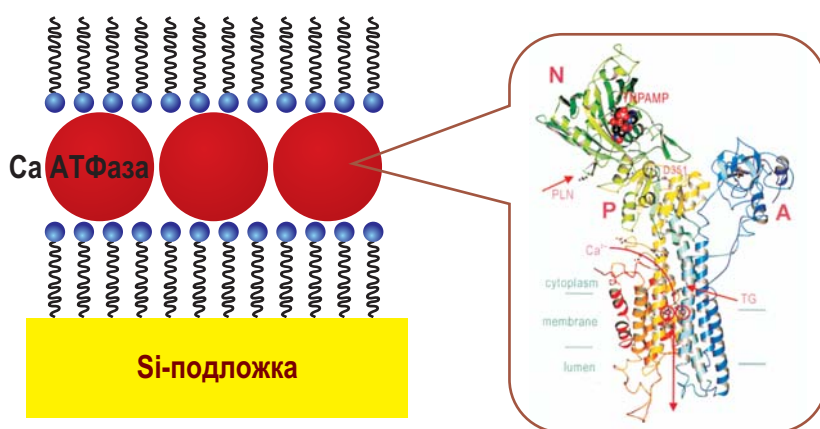
Угловые зависимости выхода флуоресценции от единичного органического монослоя (монослой фталоцианинов) на поверхности жидкости, модулированные стоячей рентгеновской волной в области полного внешнего отражения. Сканирование волновым полем одной органической молекулы позволило получить информацию о положении в ней ионов металлов.

Контроль эффективности и безопасности действия лекарственных препаратов

Использование упорядоченных белково-липидных пленок в качестве моделей клеточных мембран в биофизических исследованиях и медицинской диагностике открывает особые перспективы для разработки новых методов контроля эффективности и безопасности действия лекарственных препаратов в условиях *in vitro* (вне организма). Результаты этих исследований позволяют получать дифференциальные характеристики о механизмах действия лекарственного соединения, в отличие от интегральных данных, получаемых на целостных клетках или живом организме. Новые возможности для изучения структуры и композиционного состава белково-липидных мембранных моделей дают **рентгенофлуоресцентные методики в области полного внешнего отражения**, позволяющие "просканировать" белковую молекулу в направлении нормали к поверхности пленки, напрямую определяя место связывания атомов определенного сорта с белковой молекулой.

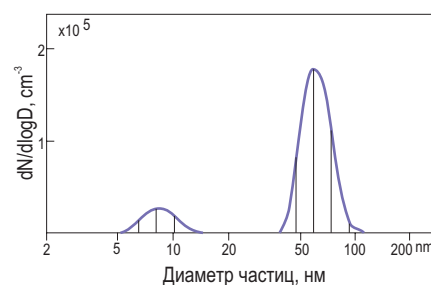
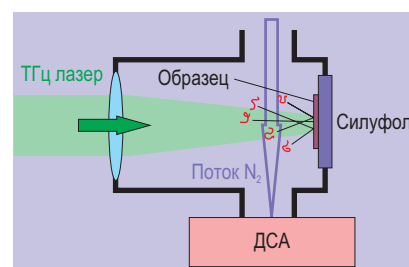


С помощью рентгено-флуоресцентных измерений исследовались молекулярные механизмы действия отечественного лекарственного препарата ксидифон при повреждении мембранных ферментов ионами свинца. В качестве модели клеточной мембраны использованы белково-липидные пленки на основе фермента Са-АТФазы и фосфолипида фосфатидил-этаноламин, нанесенные на кремниевые подложки.



Разделение ДНК и других биомолекул без денатурации с помощью терагерцевого излучения мощного ЛСЭ в целях биоинженерии, биосинтеза; управление процессами фрагментации, ингибирования и стимулирования биомолекул с помощью терагерцевого излучения в целях биоинженерии, биосинтеза.

При облучении биологических образцов короткими (десятки пикосекунд) импульсами терагерцевого излучения с высокой импульсной мощностью (\sim МВт) макромолекулы (ДНК, ферменты, вирусы) отделяются от подложки без денатурации, то есть остаются живыми, биологически активными, в силу того, что энергия квантов излучения лежит ниже порога ионизации. Дальнейшее разделение и идентификация биомолекул осуществляется при помощи высокопроизводительного масс-спектрометра, например, диффузионного спектрометра аэрозоля (ДСА).



Разделение смеси двух ДНК путем мягкой абляции. На графике: распределение по размерам аэрозольных частиц, образующихся в результате мягкой абляции кольцевой ДНК плазмиды pBScript (3.6 тнп) и ДНК фага (48 тнп)

Медицинская диагностика

Диагностика онкологических заболеваний

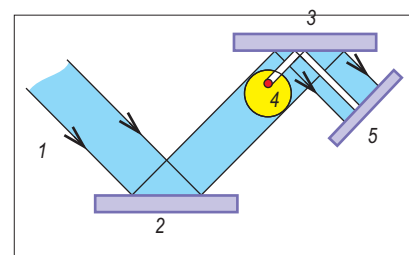
Перспективы использования синхротронного излучения в медицине связаны с ранней диагностикой онкологических заболеваний, требующей не только раннего обнаружения опухолевого образования, но и контроля его морфологии. Традиционная диагностика не позволяет выявлять рак на ранней стадии из-за отсутствия контраста на абсорбционных изображениях.

Метод рефракционной интроскопии с использованием синхротронного излучения продемонстрировал принципиальную возможность наблюдения раковых опухолей малого размера. Показано, что даже на границах раздела мягких биологических тканей рефракционный контраст может достигать величины, близкой к 100%.

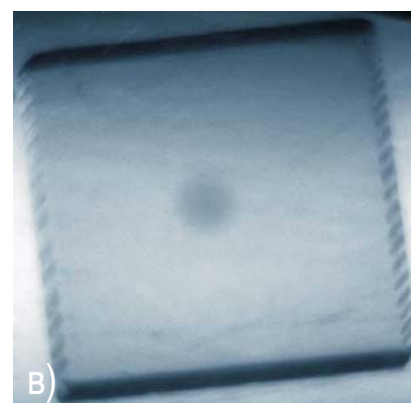
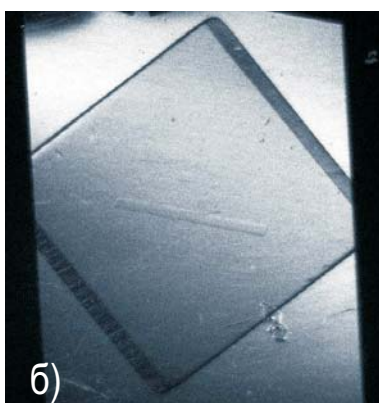
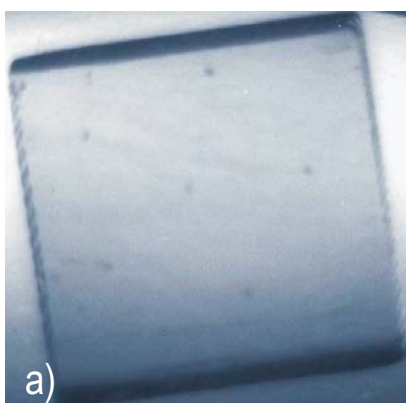
Внедрение рефракционной интроскопии позволит проводить раннюю диагностику онкологических заболеваний, в том числе обнаружение рака молочной железы, а также неинвазивную диагностику полостных органов. Повышение контраста на изображениях позволит на порядок снизить дозовую нагрузку на пациента.



Изображение задней конечности крысы, пораженной раком; стрелками указаны границы опухоли



Метод рефракционной интроскопии: 1 - пучок излучения, 2, 3 - идеальные кристаллы, 4 - объект, 5 - детектор



Рефракционные изображения фрагментов маммографического фантома с моделями (а) микрокальцинатов, (б) кальцинированного сосуда и (в) опухолевой ткани

Адаптивные контрастные среды в рефракционной медицинской диагностике

Высокая интенсивность в широком спектральном диапазоне и когерентные свойства синхротронного излучения открывают принципиально новые возможности в исследовании биологических систем, основанные на неабсорбционном механизме формирования фазового или рефракционного изображения, позволяющем наблюдать объекты малого размера с незначительными вариациями плотности.

Микроангиография — рентгенологическое исследование кровеносных сосудов малого размера перспективно как в медицинской диагностике, так и при исследовании процессов формирования кровеносной системы в различных новообразованиях. Для увеличения контрастности изображений предлагается использовать неабсорбционные контрастеры, созданные на основе нетоксичных веществ, не приносящих вреда биологическим объектам. Эти препараты представляют собой среды с мелкодисперсными неоднородностями, которые могут вызывать малоугловое рассеяние, дающее дополнительный контраст, или изменять среднее значение электронной плотности, что приведет к увеличению фазового контраста.

Рентгенография полостных органов — для контрастирования полостных органов (желудок, кишечник) могут быть использованы нетоксичные суспензии на основе мелкодисперсных частиц соединений кальция.



Фазоконтрастные изображения моделей кровеносных сосудов - капроновых лесок диаметром 1 мм в воде (а) и на воздухе (б)

2.2. Нейтронные исследования Наноматериалы

Структурные исследования в рамках развития синтеза новых наноматериалов, свойства которых определяются особенностями строения на наноуровне, являются одним из самых перспективных направлений применения нейтронного рассеяния. Особое значение при этом играет возможность одновременного использования изотопного замещения водород/дейтерий в исследуемом веществе и магнитного рассеяния нейтронов для изучения магнитных систем.

Магнитные жидкости, дисперсии магнитных наноматериалов в жидких носителях, стабилизированные с помощью добавления поверхностно-активных веществ благодаря своим уникальным свойствам во внешнем магнитном поле широко применяются во многих промышленных и технических областях, например, в громкоговорителях и высоковакуумной технике.

Наиболее эффективно для диагностики магнитных жидкостей может использоваться малоугловое рассеяние нейтронов. Данный метод может быть применен непосредственно к промышленным образцам магнитных жидкостей, при этом не требуется специальной процедуры приготовления.

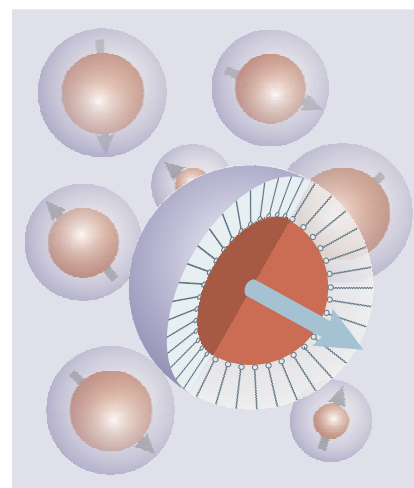
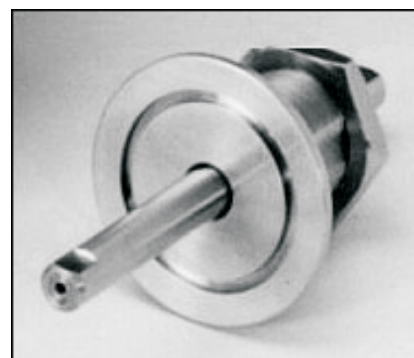
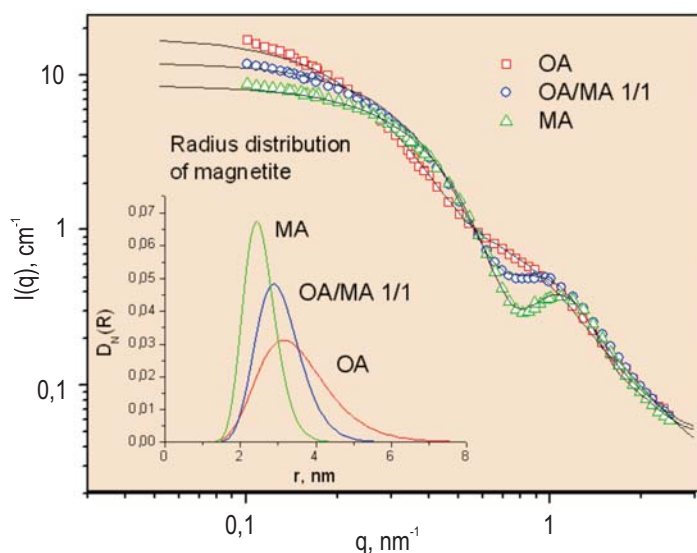


Схема строения
магнитной жидкости



Высоковакуумные затворы

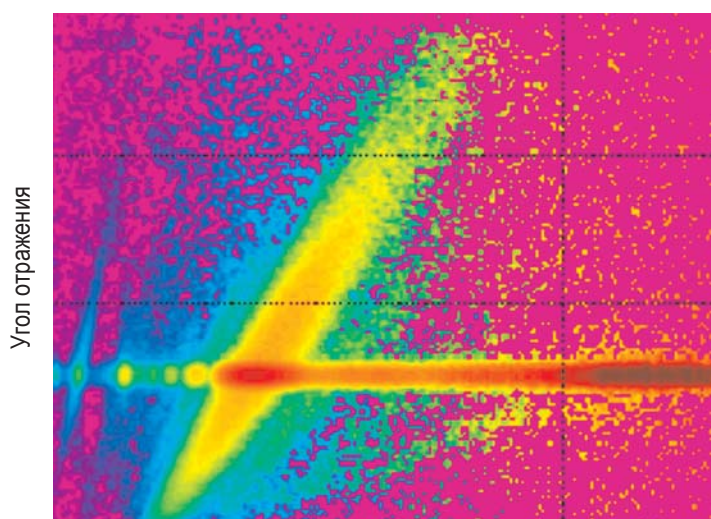
Пример использования метода малоуглового рассеяния нейтронов в диагностике магнитных жидкостей. Кривые малоуглового рассеяния нейтронов дают информацию о распределении магнитных наночастиц по размерам в магнитных жидкостях с основой на циклогексане, стабилизированных олеиновой кислотой (OA), миристиновой кислотой (MA) и их смесями. Видно, что использование различных видов поверхностно-активных веществ (ПАВ) позволяет регулировать характерный размер стабилизированных магнитных наночастиц и их дисперсность.

Тонкие **магнитные пленки** благодаря своим специфическим магнитным свойствам имеют большие перспективы применения в технологиях создания различных типов магнитной памяти, в том числе и нового типа энергонезависимой памяти с произвольным доступом (MRAM). Важную роль в этом играет совместимость методов получения магнитных наноструктур с существующей кремниевой микроэлектронной технологией.

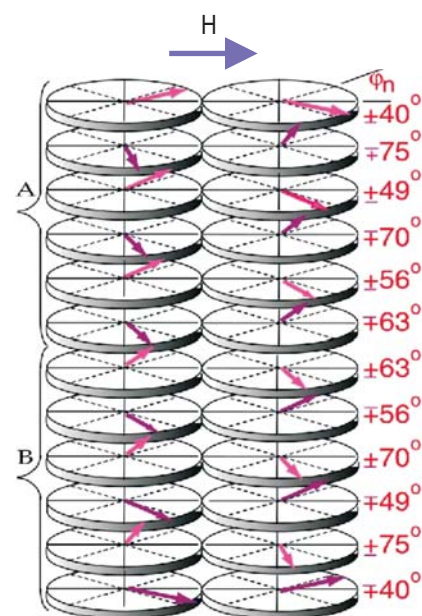
Широко используемым методом в исследованиях таких систем является **рефлектометрия поляризованных нейтронов**, которая позволяет определять одновременно распределение атомов и намагниченности по глубине нанопленок.



Магнитные накопители данных



Длина волны нейтрона



Рефлектометрия поляризованных нейтронов позволяет определить сложную структуру намагниченности слоев в системе $(\text{Fe/Cr})_{12}$, помещенной в магнитное поле. Видно, что имеет место поворот намагниченности от слоя к слою. Чувствительность метода составляет 1 нм. В настоящее время в рамках нейтронной рефлектометрии развиваются методики, которые позволяют улучшить этот параметр до 0.1 нм.

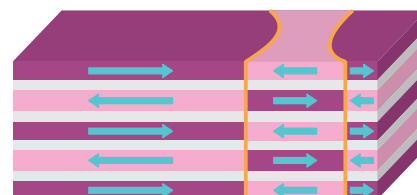
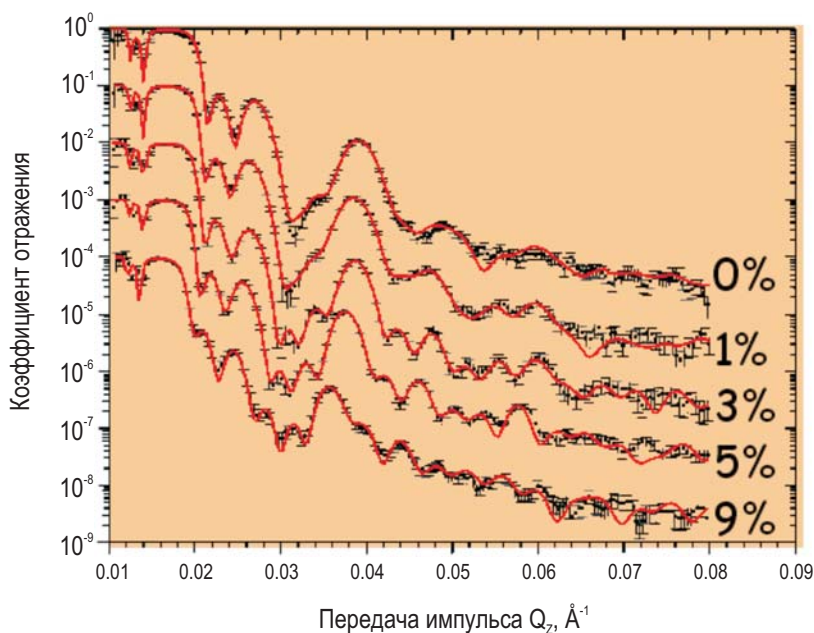


Схема многослойной тонкой пленки на основе железа и хрома с указанием направления намагниченности в слоях

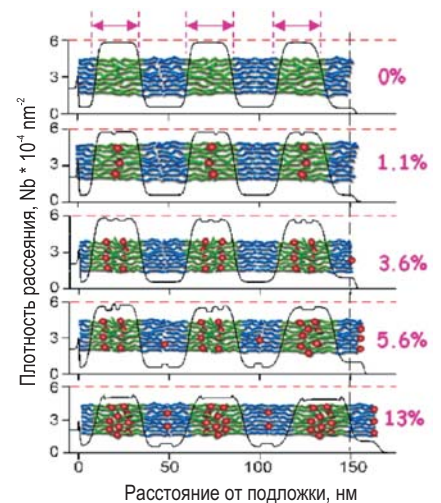
Полимеры и эластомеры

Одно из самых перспективных направлений в современной химии и физике полимеров – создание **МАГНИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ**, способных заменить обычные металлические магнитные материалы. Преимущества использования магнитных композиционных материалов обусловлены рядом факторов, таких как легкость обработки, небольшой вес и низкая себестоимость.

Современные полимерные матрицы предоставляют широкий выбор для создания специализированных магнитных устройств на основе включений в них магнитных наночастиц. Инженерные и магнитные свойства таких систем определяются не только размером, формой и химическим составом наночастиц и полимерной матрицы, но зависят также от пространственного распределения частиц внутри полимера. Последнее свойство очень эффективно исследуется методами нейтронного рассеяния: **нейтронной рефлектометрией** для тонких пленок и **малоугловым рассеянием нейтронов** для объемных образцов.



Магнитные устройства

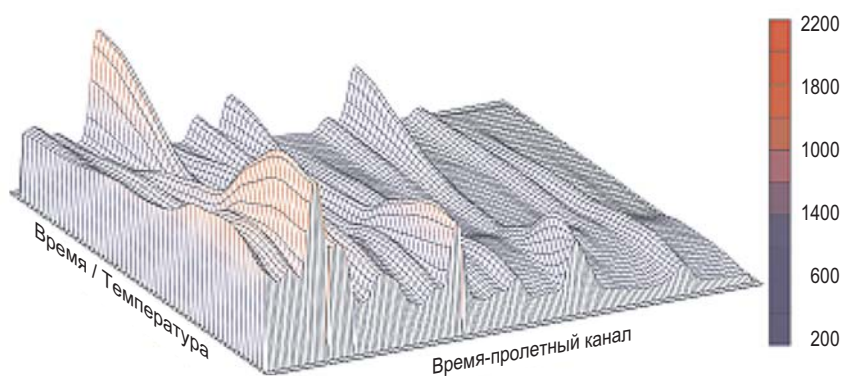


Анализ коэффициента отражения нейтронов от пленки из двублочного сополимера полистерен (дПС) - полибутилметакрилат (ПБМА) с включением наночастиц магнетита дает полное представление о распределении наночастиц по глубине в зависимости от их концентрации.

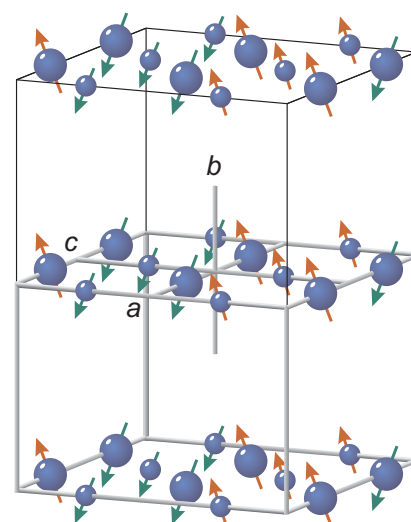
Кристаллические материалы со специальными свойствами

Важнейшим фактором развития всех отраслей промышленности, энергетики, медицины, информационных технологий является синтез новых наносистем и материалов с уникальными, заранее заданными свойствами, способных изменять свои свойства и структуру в зависимости от условий окружающей среды и контролируемых внешних воздействий.

Недавно были синтезированы новые оксидные материалы, обладающие целым рядом уникальных свойств, среди которых высокотемпературная сверхпроводимость, эффект колоссального магнетосопротивления, сегнетоэлектричество; они открывают широкие перспективы для их разнообразного технологического применения в энергетике, электронике, компьютерных технологиях. Нейтронографические исследования являются самым прецизионным методом структурного анализа материалов, содержащих легкие атомы. С их помощью удалось выявить микроскопический базис физических свойств этих соединений, основанный на уникальных особенностях кристаллической и магнитной структуры.



Твердофазная реакция синтеза высокотемпературного купратного сверхпроводника, визуализированная в реальном времени с помощью нейтронной дифракции



AFM1 Mn: $(0 \ y \ 1/2)$, $k_1 = [0 \ 0 \ 1/2]$

AFM2 Mn: $(1/2 \ 0 \ y)$, $k_2 = [1/2 \ 0 \ 1/2]$

Магнитная структура сложного оксида марганца, обладающего эффектом колоссального магнетосопротивления, полученная с помощью дифракции нейтронов

Композиционные и керамические материалы

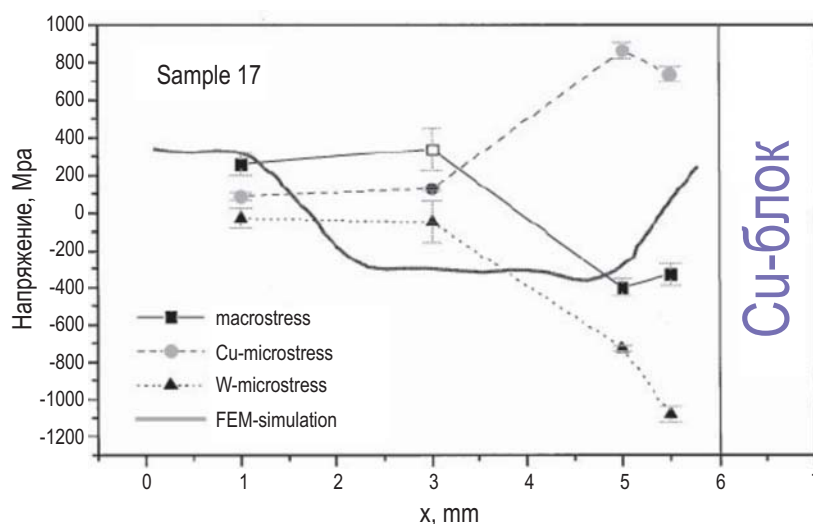
В современных технологиях зачастую требуется применение материалов с уникальным набором свойств, которыми не обладают отдельно взятые химические соединения. Решение данной проблемы достигается изготовлением композиционных и керамических материалов, состоящих из компонентов, которые по отдельности обладают необходимым набором свойств. Механические и другие свойства таких материалов в значительной степени зависят от характера распределения внутренних напряжений, связанных с межфазными границами, микротрещинами, дислокациями, точечными дефектами.

В последнее время интенсивно развивается нейтронная дифрактометрия внутренних напряжений. В отличие от традиционных методов, нейтроны могут проникать в материал на глубину до 2–3 см для сталей и до 5 см для алюминия. В случае многофазного материала (композиты, армированные материалы, керамики, сплавы) нейтроны дают информацию о распределении напряжений для каждой фазы отдельно. Таким образом, можно отметить следующие важнейшие особенности этого метода:

- 1) сохранение целостности исследуемого объекта (неразрушающий контроль);
- 2) большая глубина сканирования материала;
- 3) высокое пространственное разрешение (до 1-2 мм в любом измерении).



Труба из композиционного материала



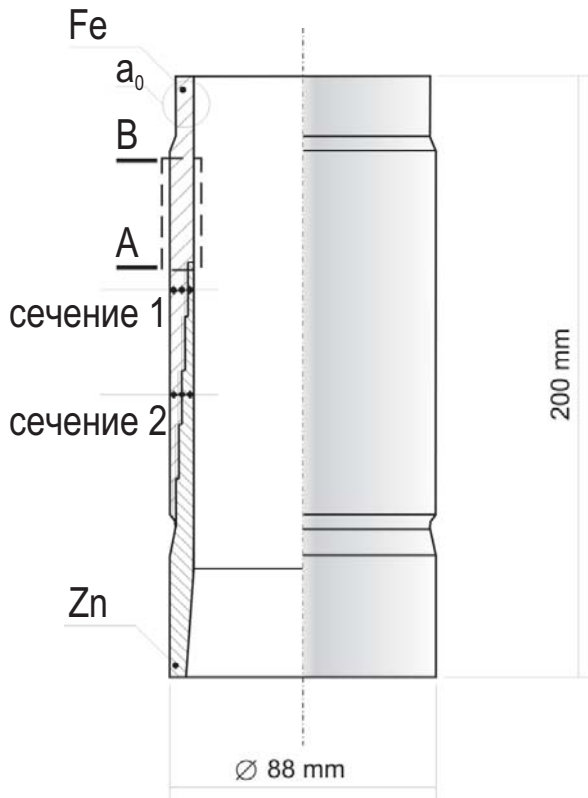
Распределение внутренних напряжений в композите W/Cu вдоль горизонтального направления образца

Инженерная диагностика

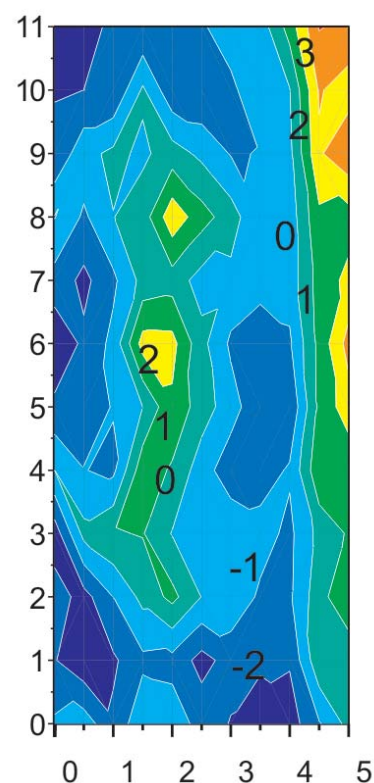
Большая глубина проникновения нейтронного излучения в вещество по сравнению с другими типами излучений дает широкие возможности нейтронной дифрактометрии внутренних напряжений для неразрушающего контроля объемных инженерных изделий из конструкционных материалов.

В процессе эксплуатации объемных инженерных конструкций и изделий вследствие воздействия циклических нагрузок происходит накопление остаточных напряжений, что вызывает потенциальную опасность разрушения отдельных деталей конструкции.

Определение остаточных напряжений с помощью методов рассеяния нейтронов имеет огромное значение как для диагностики готовых инженерных изделий, так и для отработки технологии создания инженерных изделий с повышенной износостойкостью.



Биметаллический (сталь-цирконий)
адаптер канала реактора РБМК

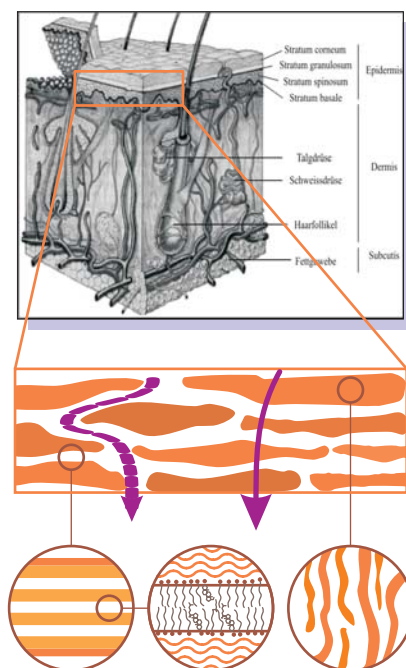
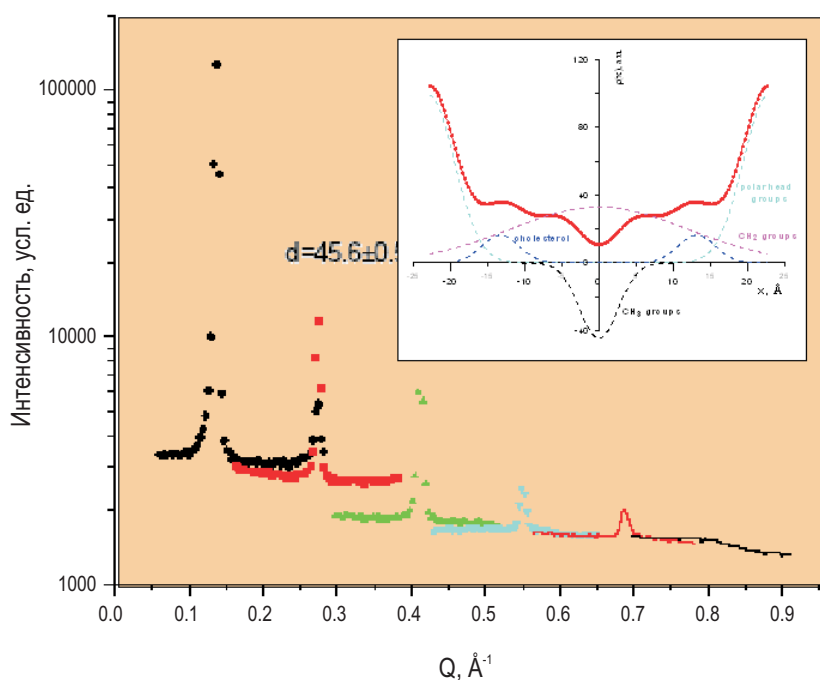


Восстановленная с помощью
нейтронной дифрактометрии карта
остаточных напряжений в
биметаллическом адаптере

Молекулярная биология и фармакология

В последнее время методы нейтронного рассеяния все больше используются для решения биомедицинских проблем, в частности, связанных с переносом лекарственных препаратов в биологических средах. Внедрение лекарства в живой организм через кожный покров с помощью различных кремов и косметики является амбициозным направлением развития современной фармацевтики. Для транспортировки лекарств через кожный покров крайне важна информация о строении липидной мембраны Stratum Corneum, самого верхнего слоя эпидермиса кожи человека. В отличие от большинства биологических мембран, состоящих из фосфолипидов, основой данной мембраны являются керамиды, которые затрудняют проникновение лекарственных препаратов в организм человека через кожный покров.

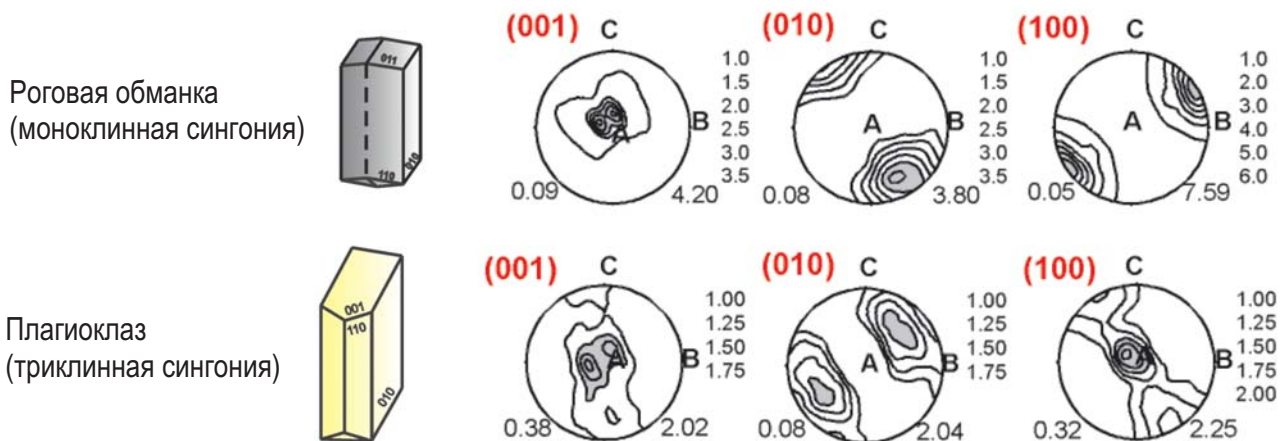
Дифракция нейтронов позволяет с высокой точностью определять структуру мембраны Stratum Corneum и отслеживать проникновение в нее различных веществ.



С помощью нейтронной дифракции при использовании изотопного замещения водород/дейтерий удается восстановить молекулярную структуру мембраны Stratum Corneum с точностью до 0.5 нм.

Геофизика и науки о Земле

Относительно новой областью применения нейтронных методов является геофизика и науки о Земле. Для предсказания землетрясений и извержений вулканов, изучения изменений рельефа земной поверхности и океанического дна, решения прикладных задач, например, обоснования выбора мест для строительства глубоководных хранилищ радиоактивных отходов, необходима информация о деформациях и напряженном состоянии горных пород. Для получения этой информации в настоящее время широко используется нейтронографический текстурный анализ, который позволяет с высокой точностью исследовать кристаллографические текстуры относительно больших крупнозернистых образцов горных пород, т.е. дает информацию о преимущественной пространственной ориентировке кристаллических решеток зерен по всему минеральному ансамблю.



Нейтронные текстурные исследования геологических пород. Амфиболит 8752, Кольская сверхглубокая скважина. Полученные полюсные фигуры составляющих пород

3

3. Источники СИ и нейтронов: российский потенциал

3.1. Источники синхротронного излучения

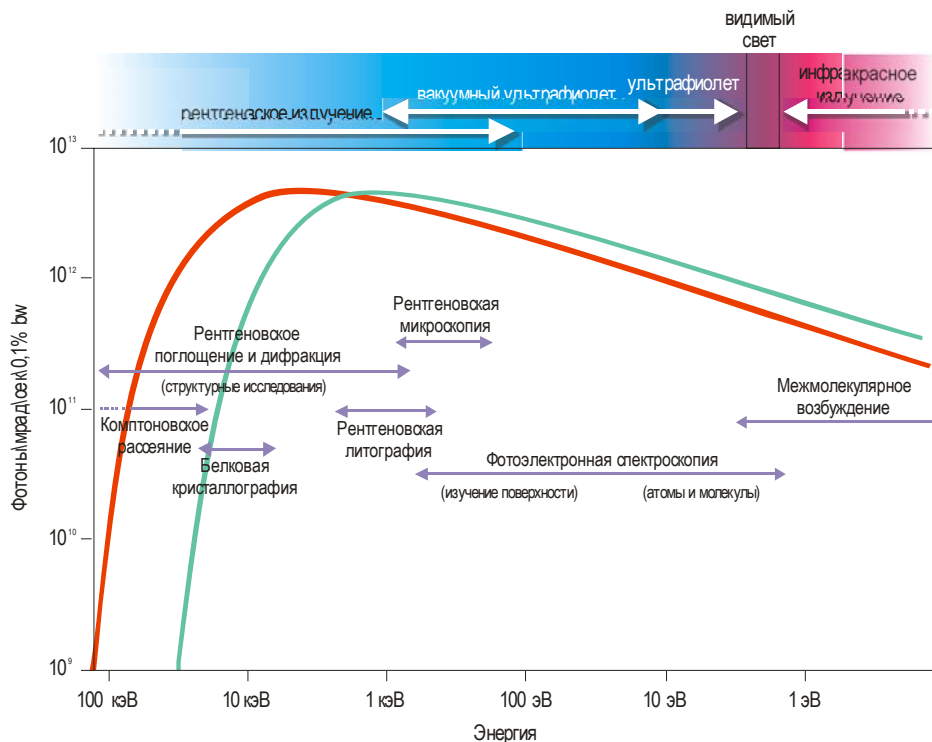
Открытие рентгеновского излучения повлекло за собой развитие огромного количества методов и методик исследования вещества. До начала 60-х годов прошлого столетия эти исследования велись с использованием характеристического спектра излучения из рентгеновских трубок, интенсивность которого за время со дня открытия рентгеновского излучения выросла не более чем на два порядка.

Синхротронное излучение имеет существенные преимущества перед обычными источниками излучения, например, рентгеновскими трубками, по целому ряду параметров:

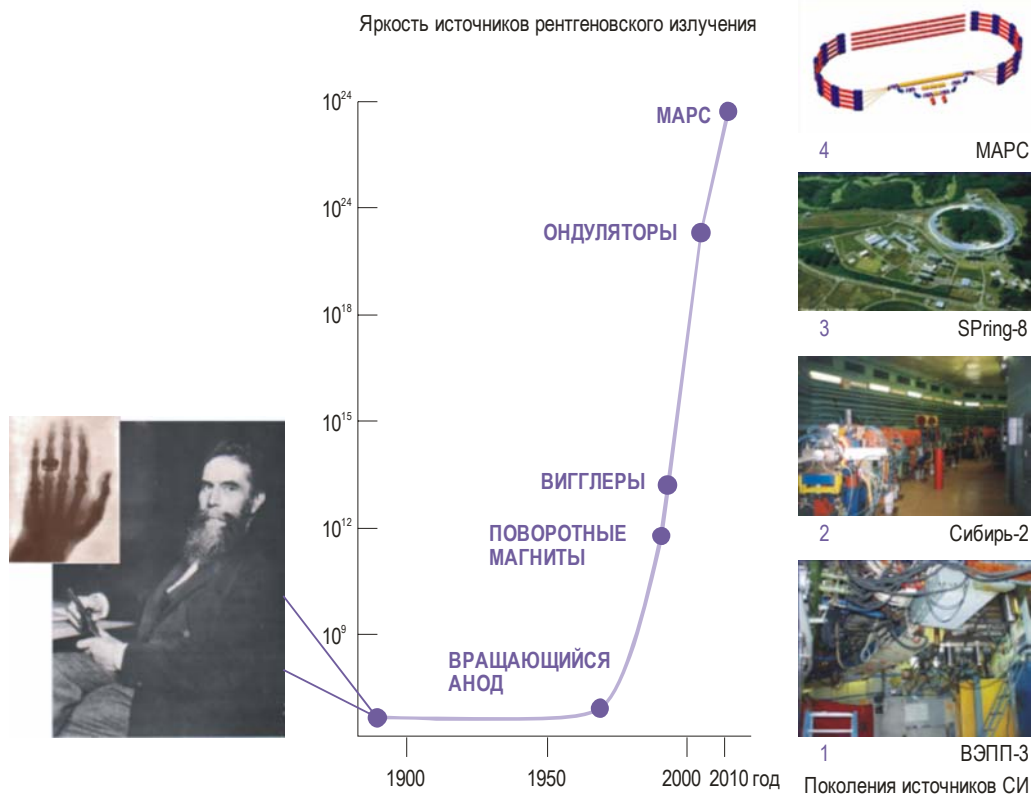
- широкий спектральный диапазон, простирающийся от инфракрасного до жесткого гамма-излучения;
- высокая спектральная яркость, превышающая яркость рентгеновских трубок в 10^{10} – 10^{12} раз;
- поляризация – управляемая, с возможностью быстрого переключения типа (линейная, циркулярная) и знака;
- временная структура – регулярно повторяющиеся импульсы с длительностью, лежащей в пикосекундном или фемтосекундном диапазоне;
- естественная коллимация.

Синхротронное излучение все более активно используется во всем мире для решения широкого круга фундаментальных и прикладных проблем в физике, химии, материаловедении, биологии, медицине. В последнее время особую актуальность получили задачи, связанные со структурной диагностикой атомарного уровня разрешения для конструирования материалов с заданными свойствами, для создания и исследования сверхчистых и наноструктурных материалов, с исследованием структуры и процессов в органических и биологических объектах для геномной инженерии, биотехнологии, синтеза новых лекарственных препаратов, с созданием новых методов медицинской диагностики, с развитием новых технологий формирования субмикронных структур в микроэлектронике и микромеханике, с созданием новых технологий утилизации промышленных отходов и высокоточным анализом загрязнений окружающей среды.

Яркость и поток синхротронного излучения непрерывно увеличиваются благодаря современным сильнофокусирующим ускорителям с большим накопленным током, стабильным электронным пучком, применению специальных магнитных систем для генерации СИ – вигглеров, ондуляторов, сильнополевых сверхпроводящих поворотных магнитов.



Области применения синхротронного излучения в научных исследованиях



Развитие источников рентгеновского излучения – история и прогноз

(по величине спектральной яркости $\frac{\text{фот}}{\text{сек} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{мрад}^2 (0,1\% \Delta\lambda/\lambda)}$).

Справа – примеры источников СИ разных поколений.

а) Современное состояние источников СИ и ЛСЭ в России

В настоящее время в России работают несколько источников СИ и ЛСЭ на базе накопителей электронов, которые представлены в таблице.

Основные центры СИ и ЛСЭ в России

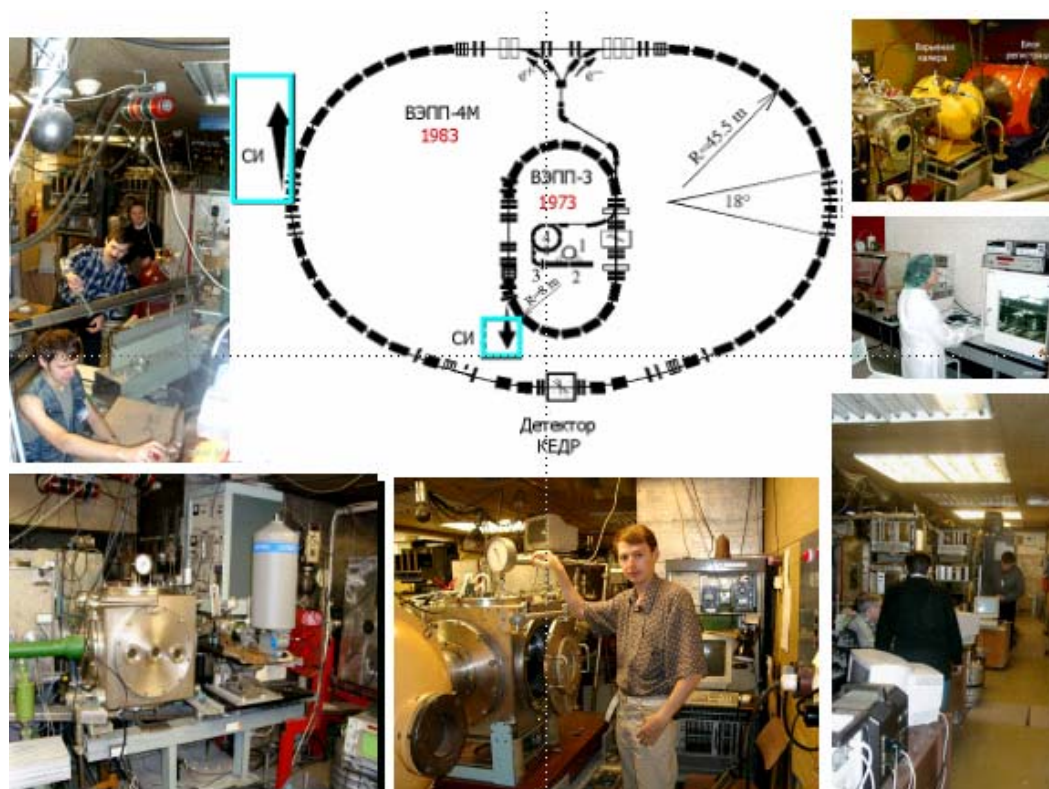
Название установки	Местоположение	Год запуска	Основные параметры	Кол-во приборов
ВЭПП-3	Новосибирск, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН	1973	$E_e = 2 \text{ ГэВ}$, $I_e = 150 \text{ мА}$	12
ВЭПП-4М	Новосибирск, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН	1983	E_e - до 6 ГэВ, $I_e = 40 \text{ мА}$	2
«Сибирь-1»	Москва, РНЦ «Курчатовский институт»	1982	$E_e = 450 \text{ МэВ}$, $I_e = 360 \text{ мА}$	6
«Сибирь-2»	Москва, РНЦ «Курчатовский институт»	2000	$E_e = 2,5 \text{ ГэВ}$, $I_e = 150 \text{ мА}$	12
ТНК «Зеленоград»	Зеленоград, ИФП им.Ф.В.Лукина	В стадии создания	$E_e = 1.6 \text{ ГэВ}$, $I_e = 200\text{-}300 \text{ мА}^*$	-
Терагерцевый ЛСЭ 1-й очереди	Новосибирск, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН	2003	$\lambda = 120\text{-}235 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda/\lambda \sim 2 \cdot 10^{-3}$, $P = 400 \text{ Вт}$ (2005 г.) $P \sim 1\text{-}2 \text{ кВт}$ (2007 г.) [*]	4
Инфракрасный ЛСЭ 2-й очереди	Новосибирск, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН	2007-2008 [*]	$\lambda = 3\text{-}30 \text{ и } 30\text{-}120 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda/\lambda \sim 2 \cdot 10^{-3}$, $P \sim 10 \text{ кВт}^*$	-

E_e – энергия электронов, I_e – накопленный ток электронов, λ – длина волны излучения, $\Delta\lambda/\lambda$ – спектральная ширина излучения, P – средняя мощность излучения.

* Проектные значения

Наиболее перспективными для изучения наноструктур и материалов центрами СИ являются Сибирский центр синхротронного излучения (ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск) и Курчатовский источник синхротронного излучения (КИСИ, РНЦ “Курчатовский институт”, Москва).

Работы на пучках СИ в **Сибирском центре синхротронного излучения**, созданном на базе ускорителей и лабораторий ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН, были начаты в 1973 году, и более 25 лет он оставался основным и практически единственным местом проведения подобных исследований в России.



Сибирский центр синхротронного излучения

Большим препятствием для дальнейшего развития исследовательских методов с использованием СИ в Сибирском центре в настоящее время и на дальнюю перспективу является отсутствие современных специализированных источников СИ, проекты которых уже разработаны в ИЯФ.

КИСИ РНЦ «Курчатовский институт» – наиболее современный, первый и единственный в России специализированный ускорительно - накопительный комплекс (УНК), предназначенный для широкопрофильных исследований с применением электромагнитного излучения в инфракрасной, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. КИСИ включает в себя линейный ускоритель в качестве форинжектора и два накопителя электронов: “Сибирь-1” на энергию 450 МэВ и периметром 8.68 м и “Сибирь-2” на энергию 2.5 ГэВ с периметром 124.13 м.



Здание КИСИ РНЦ «Курчатовский институт»

В настоящее время на УНК КИСИ действуют и готовятся к запуску 17 экспериментальных станций, с увеличением рабочих площадей планируется увеличить количество действующих станций до 32.

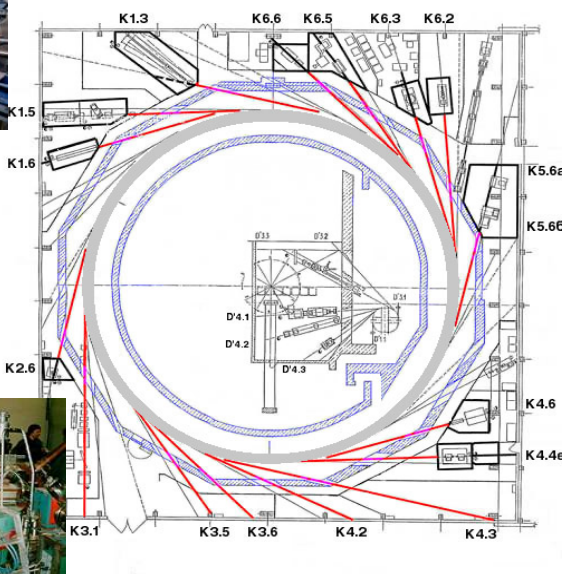
Линейный ускоритель



Пульты



Малый накопитель



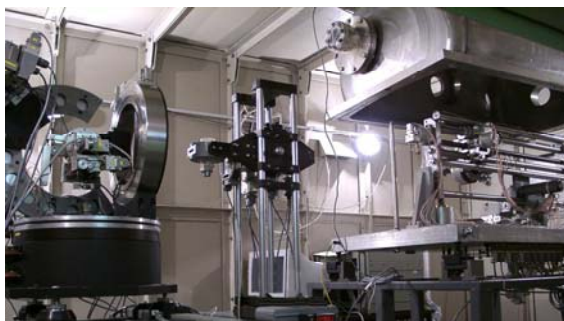
Большой накопитель



Курчатовский источник синхротронного излучения

Экспериментальные станции КИСИ

№	Станция	Полное название станции
1.	ДИКСИ	Станция для скоростной малоугловой дифрактометрии
2.	СТМ	Станция малоуглового рассеяния
3.	РСА	Станция рентгеноструктурного анализа
4.	РТ-МТ	Станция рентгеновской топографии и микротомографии
5.	Гамма	Станция для исследования фотоядерных реакций
6.	Медиана	Станция комплексных исследований по медицинской диагностике
7.	Белок	Станция белковой кристаллографии
8.	РКФМ	Станция рентгеновской кристаллографии и физического материаловедения
9.	РЕФРА	Станция рентгеновской рефракционной оптики
10.	EXAFS	Флуоресцентный EXAFS-спектрометр
11.	ЛИГА	Станция глубокой рентгеновской литографии
12.	ПРО	Станция прецизионной рентгеновской оптики
13.	Ленгмюр	Станция синтеза и исследования органических наносистем в нативном состоянии
14.	Вакуум	Станция роста и диагностики неорганических наноплёнок
15.	ФЭС	Станция фотоэлектронной спектроскопии
16.	СПЕКТР	Станция спектроскопии конденсированного состояния
17.	ЛОКУС	Станция люминесцентных и оптических исследований



Станция прецизионной
рентгеновской оптики «ПРО»



Станция комплексных исследований по
медицинской диагностике "Медиана"



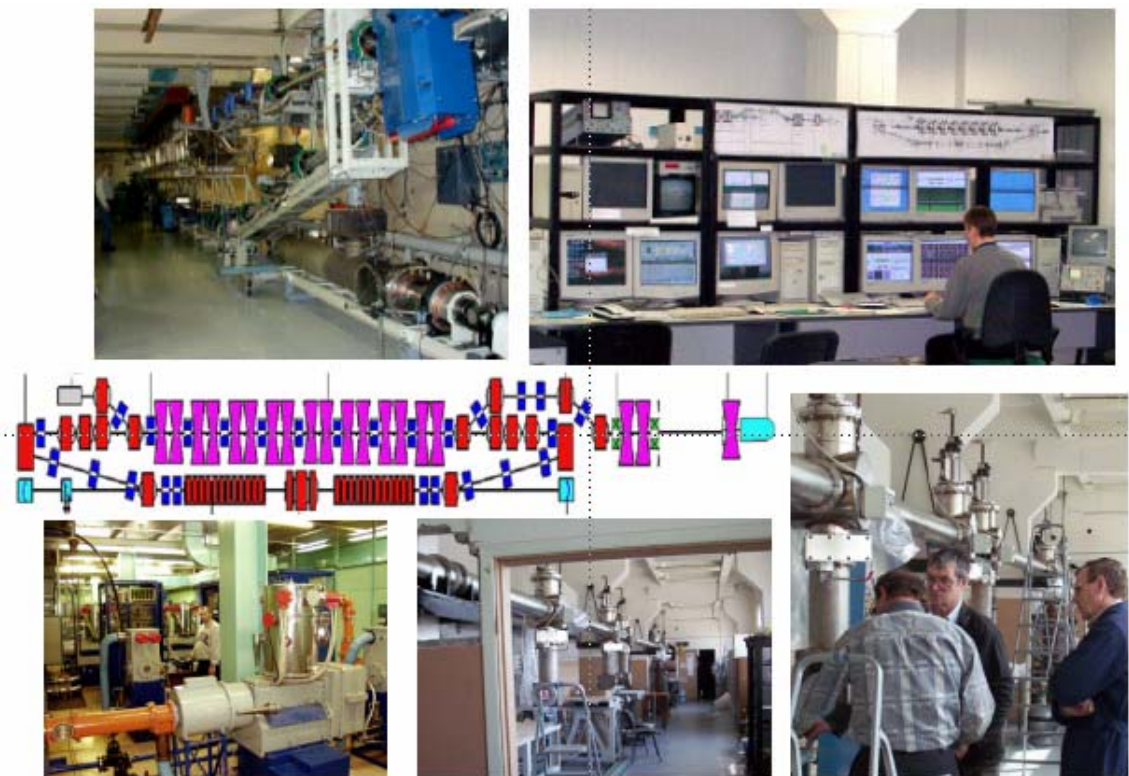
Станция белковой кристаллографии «Белок»



Станция глубокой рентгеновской
литографии «ЛИГА»

Экспериментальные станции КИСИ

Уникальной исследовательской установкой является **лазер на свободных электронах (ЛСЭ)**, построенный Институтом ядерной физики СО РАН в Новосибирске. Он позволяет получать монохроматическое когерентное излучение в терагерцевом диапазоне частот (длины волн 120 – 230 мкм) с рекордной средней мощностью – 400 Вт. При помощи этого излучения уже ведутся эксперименты с биологическими макромолекулами, наночастицами и искусственными микроструктурами. Дополнительно к имеющимся четырем рабочим станциям сооружаются еще две. Строящаяся сейчас вторая очередь ЛСЭ позволит расширить диапазон длин волн излучения до 5 мкм при средней мощности до нескольких кВт.



Новосибирский терагерцевый лазер на свободных электронах и экспериментальные станции

б) Перспективы развития

ТНК Зеленоград

Технологический источник СИ “ТНК Зеленоград” базируется на накопителе с энергией электронов 1.6 ГэВ и допускает, при дальнейшем развитии ускоряющей ВЧ-системы, увеличение энергии до 2.5 ГэВ (в этом случае по параметрам он будет близок к источнику СИ “Сибирь-2”). Его ориентация определяется задачами микромеханики, микроэлектроники, полупроводникового материаловедения и нанотехнологий. Строительные работы завершены: зал ускорителя и лабораторный корпус площадью 20 тыс. кв. м, который частично укомплектован. Ускоритель в основном изготовлен. К началу 2005 г. были смонтированы основные системы бустерного кольца, и в течение года проводились работы с пучком. К концу года были получены захват и ускорение электронного пучка в бустерном кольце.

УНК КИСИ

В накопителе “Сибирь-2” на стадии проекта была заложена возможность последующей модернизации, предусматривающей постановку вигглеров и ондуляторов. Ближайшие перспективы связываются с тем, что в 2006 г. завершаются работы по изготовлению сверхпроводящего вигглера с магнитным полем 7,5 Тл и 19 парами полюсов, который будет установлен в один из прямолинейных промежутков на кольце накопителя “Сибирь-2”. Этот вигглер увеличит интенсивность СИ до $(10^{14}-10^{13})$ фот/с/0.1%BW в максимуме спектра, соответствующего фотонам с энергиями 25÷50 кэВ. Интенсивность фотонов с энергиями в диапазоне 5÷10 кэВ, реализуемом в настоящее время с помощью поворотных магнитов, увеличится более чем на порядок, а расширение спектра СИ в коротковолновую область увеличит число фотонов вблизи 200 кэВ в 100 и более раз. Это даст возможность работы с материалами, содержащими тяжелые, в частности трансурановые, элементы. Кроме того, улучшатся потребительские параметры СИ, так как при постановке многополюсного вигглера уменьшится фазовый объем пучка электронов и увеличится яркость СИ на каждой экспериментальной станции.

Следует отметить, что узлы и системы УНК КИСИ были изготовлены около 15 лет назад и на тот момент представляли собой самые передовые технические решения. Но в связи со сложившимися в стране экономическими трудностями начало работы источника на проектных параметрах задержалось до 2000 г., в то время как в мире уже появились источники СИ следующего – третьего – поколения (1992 г.) со значительно лучшими техническими характеристиками. На таких источниках СИ для генерации используют, как правило, не поворотные магниты, а специализированные вставные устройства – вигглеры и ондуляторы.

Поэтому развитие УНК КИСИ в ближайшие 3–5 лет связывается с созданием на базе существующего накопителя “Сибирь-2” источника СИ третьего поколения, что надолго обеспечит его конкурентоспособность.

Основными целями развития УНК КИСИ являются:

- повышение спектральной яркости СИ;
- расширение работ с СИ из поворотных магнитов и из многополюсных вигглеров с малым периодом магнитного поля и с квазимонохроматическими пучками из мини-ондуляторов, расширение спектра СИ до энергий фотонов 1–20 кэВ;
- долговременная работа экспериментальных станций с пучками СИ в непрерывном режиме с высокой степенью стабилизации фотонных пучков при неизменных интенсивностях и спектральных свойствах излучения.

Для достижения поставленных задач необходимо:

- создание бустерного синхротрона на энергию $E = 0.07\text{--}2.5$ ГэВ для инъекции в “Сибирь-2” на полной энергии 2.5 ГэВ;
- модернизация накопителя “Сибирь-2” посредством создания оптической структуры с малыми эмиттантами;
- создание новых каналов СИ из поворотных магнитов, вигглеров, мини-ондулятора, получение гамма-излучения на эффекте обратного комптоновского рассеяния.

Проект MAPS

Проект источника СИ четвертого поколения MAPS разработан Институтом ядерной физики СО РАН. Этот источник основан на многооборотном ускорителе-рекуператоре. Излучение формируется в линейных промежутках в длинных ондуляторах. Основные параметры: энергия электронов – 6 ГэВ, средний ток электронов – 3 мА. В этом комплексе может быть достигнута спектральная яркость

$$10^{24} \frac{\text{фот}}{\text{с} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{мрад}^2 (0,1\% \Delta\lambda/\lambda)},$$

которая на четыре порядка превосходит яркость

современных источников СИ 3-го поколения “Spring-8” (Япония), ALS (США) и ESRF (Франция). Запуск источника СИ MAPS позволил бы российским ученым надолго “обогнать, не догоняя” исследования, проводимые на источниках СИ 3-го поколения в Японии, США, Франции, Швейцарии (эти источники СИ не строились в России из-за их крайне высокой стоимости, 1-2 млрд. долл. для источника СИ и до 3 млрд. долл. с учетом инфраструктуры).

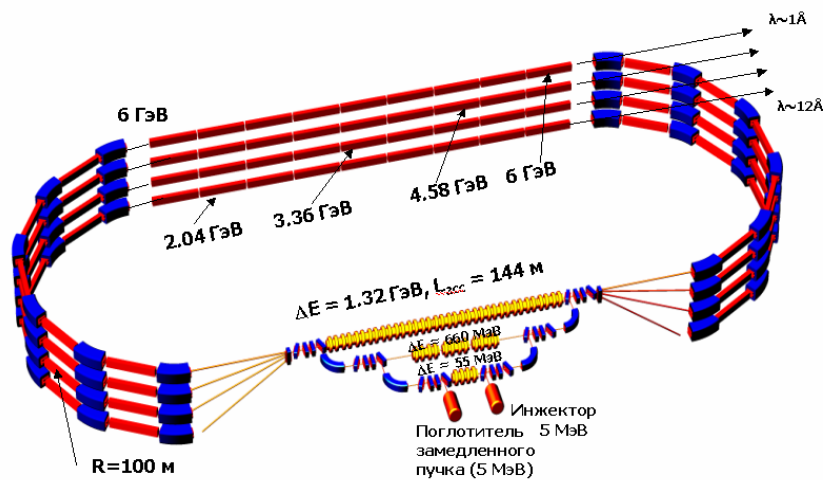


Схема источника СИ МАРС

Вторая очередь ускорителя-рекуператора для ЛСЭ, сооружаемая сейчас в Новосибирске, является уменьшенным прототипом установки МАРС. На ней должна быть исследована динамика электронов в многопроходном ускорителе-рекуператоре и отработаны методы управления электронным пучком. Два новых ЛСЭ и несколько экспериментальных станций, установленных на второй очереди ускорителя-рекуператора, позволят вести фотохимические исследования, включая технологические.

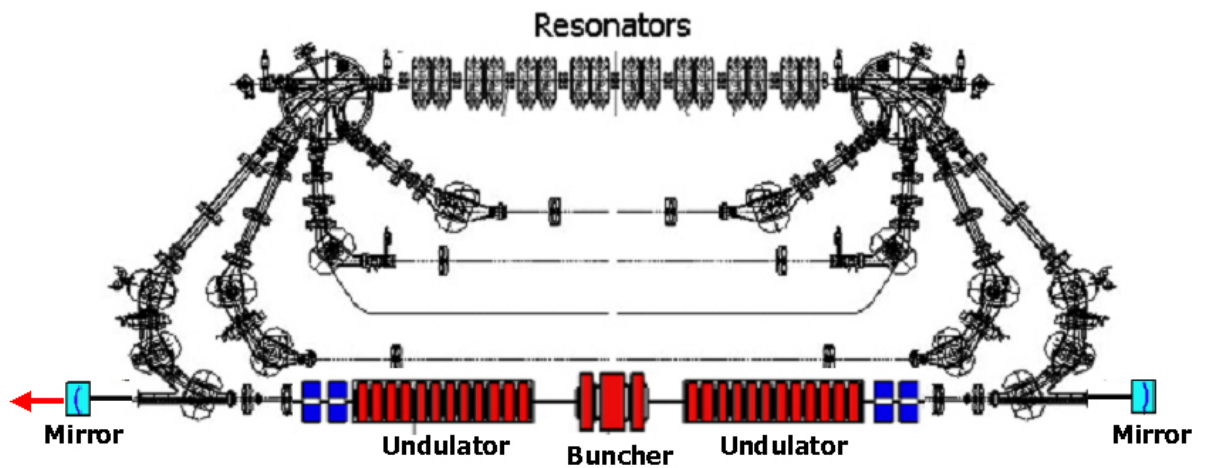


Схема второй очереди новосибирского ЛСЭ

3.2. Источники нейтронов

Нейтронная физика – это одно из направлений фундаментальных исследований, в котором отечественная наука на протяжении полувека удерживала лидирующие позиции в мировом научном сообществе. На фоне продолжающегося в мире строительства новых современных нейтронных источников (Германия, Япония, Корея, Китай, Аргентина и т.д.) положение России, в области исследований с помощью нейтронов выглядит сегодня весьма скромным и ухудшается.

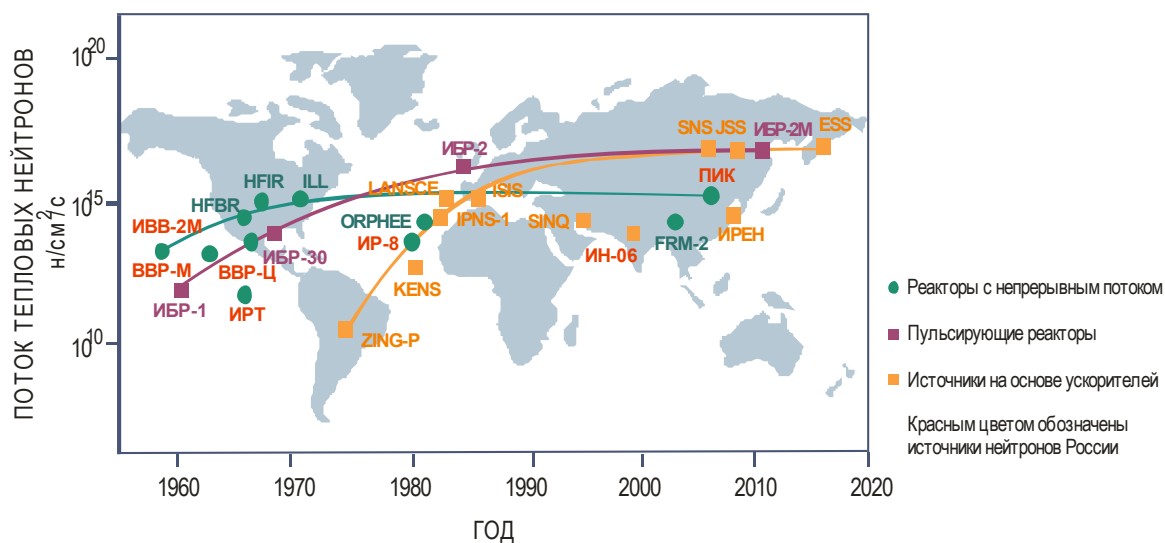
Новые нейтронные источники для исследовательских целей не создавались на протяжении нескольких последних десятилетий. Сейчас в России существует единственный современный источник – это импульсный реактор ИБР-2 в международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна, Московской области (10^{16} н/см²с в импульсе), но его средний во времени поток (10^{13} н/см²с) не всегда достаточен.

В настоящее время рассеяние нейтронов практически уходит от изучения атомной или/и магнитной структуры и динамики простых кристаллов. Акцент все более делается на изучении наноструктур, разупорядоченных систем, сложных химических реакций, процессов катализа. Расширяется активность в области исследования сложных жидкостей, самоорганизующихся систем, экзотических электронных состояний.

Все эти задачи могут быть поставлены и решены только на современных высокопоточных источниках нейтронов – ядерных реакторах или источниках на базе протонных ускорителей. В ядерных реакторах интенсивные пучки нейтронов получаются в результате цепной реакции деления тяжелых ядер (^{235}U , ^{239}Pu) с выходом нейтронов 1 н/акт деления. В источниках на базе протонных ускорителей для получения нейтронных пучков используют ядерную реакцию испарения в результате бомбардировки мишени из тяжелых элементов пучками протонов высокой энергии. Для примера, выход нейтронов для мишени из Pb при бомбардировке протонным пучком с энергией 1 ГэВ составляет 20 н/р.

В настоящее время в мире работают около 30 средне- и высокопоточных источников нейтронов, используемых для исследования конденсированных сред. На рисунке показано развитие источников нейтронов в мире до 2020 года. Проблема, однако, заключается в том, что большинство этих источников имеет возраст, приближающийся к 30 годам, что считается пределом их эксплуатационного периода. Соответственно в ближайшее десятилетие ожидается, что количество имеющихся нейтронных источников (при условии, что новые источники не будут созданы) уменьшится более чем в два раза. Этот факт не может не вызывать беспокойства научного сообщества, и в связи с этим в мире отчетливо прослеживаются следующие тенденции по решению указанной проблемы:

1. Создание исследовательских пучковых реакторов нового поколения. В 2005 г. был введен в строй реактор в Мюнхене (Германия) мощностью 20 МВт, в 2006 г. вводятся в эксплуатацию реакторы в Австралии (10 МВт) и в Китае (60 МВт).
2. Создание нейтронных источников следующего поколения на основе мощных протонных ускорителей. Данные источники должны быть доступны всему мировому научному сообществу и служить важным элементом всемирной научно-исследовательской инфраструктуры. На сегодня в стадии реализации находится проект в США – источник SNS (окончание строительства в 2006 г.), в Японии – нейтронный источник комплекса JSS (окончание строительства в 2008 г.) и обсуждается общеевропейский проект ESS. Стоимость каждого из этих проектов порядка $1 \div 2$ миллиардов долларов США.
3. Поддержание на современном уровне действующих и вновь создаваемых источников нейтронов меньшей мощности с целью создания региональных исследовательских инфраструктур в области нейтронных исследований.
4. Активное развитие и оптимизация экспериментальной и приборной базы нейтронных исследований. Для стационарных источников нейтронов наиболее оптимальными являются спектрометры, для которых определяющую роль играет средняя по времени интенсивность нейтронного потока. Наоборот, для импульсных источников нейтронов максимальные преимущества имеют спектрометры, использующие технику времени пролета, для которых наиболее важна пиковая интенсивность нейтронов в каждом импульсе источника. Кроме того, развитие новых методов поляризации нейтронных пучков, детекторов тепловых и холодных нейтронов, селекторов скоростей и кристаллических монохроматоров, а также других элементов современных спектрометров нейтронов позволит поднять эффективность исследований примерно на два порядка.



а) Современное состояние источников нейтронов в России

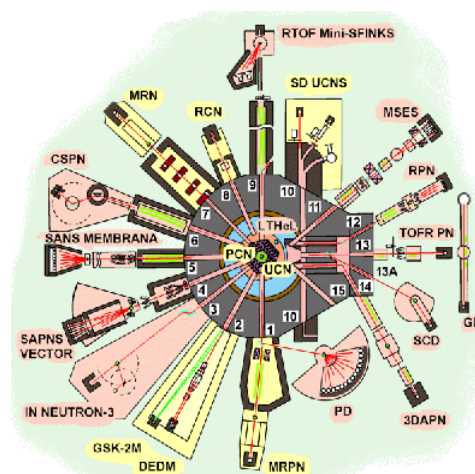
В России имеется лишь несколько низко- и среднепоточных источников нейтронов, на которых с заметной активностью проводятся исследования вещества на выведенных пучках. Это реакторы постоянного действия в Российском научном центре «Курчатовский институт» (Москва), Петербургском институте ядерной физики РАН (Гатчина), Институте реакторных материалов (Заречный), Московском государственном инженерно-физическом институте (Техническом университете) (Москва), филиале Физико-химического института (Обнинск), а также импульсный источник ИН-06 на базе протонного ускорителя в Институте ядерных исследований РАН (Троицк). В таблице 1 приведены их сравнительные характеристики. Реакторы расположены в порядке эффективности использования (числа установок и числа экспериментов в год).

Таблица 1. Характеристики нейтронных источников России для пучковых исследований (в порядке эффективности использования)

Название установки	Месторасположение	Год пуска	Мощность МВт	Поток нейтронов 10^{14} н/см ² /сек	Кол-во приборов
Реактор ВВР-М	Гатчина, ПИЯФ РАН	1959	18	4	15
Реактор ИВВ-2М	Заречный, ИРМ, ИФМ УрО РАН	1966/83	15	2	5
Реактор ИР-8	Москва, РНЦ КИ	1981	8	1	4
Реактор ИРТ	Москва, МИФИ	1967/75	2.5	0.3	4
Реактор ВВР-Ц	Обнинск, филиал НИФХИ	1964	13	1	1
Источник ИН-06 на ускорителе ММФ	Троицк, ИЯИ РАН	1998	0.2 (средняя)	0.005 средняя 0.01 в импульсе	2
Реактор ПИК	Гатчина, ПИЯФ РАН	в стадии создания	100	50	36

Реакторный комплекс ВВР-М

Реактор ВВР-М (ПИЯФ РАН, Гатчина) был создан в конце 1959 г. и до сих пор остается стабильно работающей ядерной установкой и единственным реактором в системе Российской академии наук. На реакторе проводятся исследования в области физики конденсированного состояния, радиационного материаловедения, радиобиологии, а также ядерной физики и в других смежных областях. Реактор оснащен 15 специализированными установками для проведения исследований наносистем и материалов, в их числе – дифрактометры для исследования монокристаллов, порошковый дифрактометр, порошковый фурье-дифрактометр, трехосный, времяпролетный и спин-эхо-спектрометры неупругого рассеяния нейтронов, спектрометр и рефлектометр поляризованных нейтронов.



Экспериментальный зал реактора ВВР-М и схема размещения нейтронных спектрометров

Спектрометры реактора ВВР-М

№	Спектрометр	Полное название спектрометра
1.	PD	Порошковый дифрактометр для структурных исследований
2.	GSK-2M DEDM	Кристалл-дифракционный фокусирующий спектрометр и установка ДЭДМ
3.	Neutron-3	Трехосный нейтронный спектрометр
4.	Vector	Малоугловой дифрактометр с поляризованными нейтронами
5.	Membrana-2	Малоугловой дифрактометр
6.	CSPN	Времяпролетный спектрометр
7.	MRN	Механический многоротный монохроматор нейтронов
8.	Mini-SFINKS	Нейтронный обратный порошковый фурье-дифрактометр
9.	MSES	Спин-эхо спектрометр тепловых нейтронов
10.	RPN	Двухкристальный спектрометр поляризованных нейтронов
11.	RPN-2M	Двухмодовый рефлектометр на поляризованных нейтронах
12.	SCD	Четырехкружный дифрактометр
13.	3DAPN	Малоугловой дифрактометр с трехмерным анализатором поляризации
14.	LTHEL	Низкотемпературная гелиевая петля
15.	GD	Гамма-дифрактометр

Реактор ИР-8

Реактор ИР-8 (РНЦ «Курчатовский институт», Москва) активно используется для научных исследований с начала 80-х гг. В настоящее время он оснащен 4 действующими спектрометрами, которые могут эффективно использоваться для исследования наносистем и материалов. Максимально возможное число нейтронных каналов составляет 12.



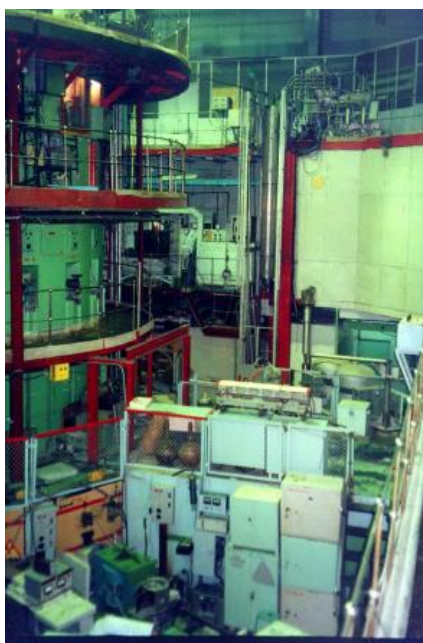
Экспериментальный зал реактора ИР-8

Спектрометры реактора ИР-8

№	Спектрометр	Полное название спектрометра
1.	МОНД	Монокристалльный дифрактометр
2.	ДИСК	Мультidetекторный порошковый дифрактометр
3.	АТОС	Трехосный нейтронный спектрометр
4.	СТОИК	Спектрометр для исследований методами рефракционного контраста и малоуглового рассеяния

Реактор ИВВ-2М

На базе реактора ИВВ-2М (г. Заречный, ИРМ и ИФМ УрО РАН), оборудованного комплексом из 5 дифрактометров и спектрометров, работает нейтронный материаловедческий центр. На реакторе исследуется широкий круг задач радиационного материаловедения, радиационной физики, конденсированного состояния, магнетизма и сверхпроводимости. Уникальные возможности осуществления низкотемпературного нейтронного облучения позволяют проводить передовые исследования влияния радиационного разупорядочения на структурные характеристики и физико-механические свойства конструкционных материалов – сталей, сплавов и др., применяемых в реакторостроении.



Экспериментальный зал реактора ИВВ-2М

Спектрометры реактора ИВВ-2М

№	Полное название спектрометра
1.	Многоцелевой двухосный нейтронный дифрактометр высокого разрешения
2.	Порошковый нейтронный дифрактометр высокого разрешения
3.	Многодетекторный нейтронный дифрактометр для исследования монокристаллов
4.	Спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов
5.	Многоцелевой нейтронный дифрактометр с высокой светосилой

б) Участие в международных организациях

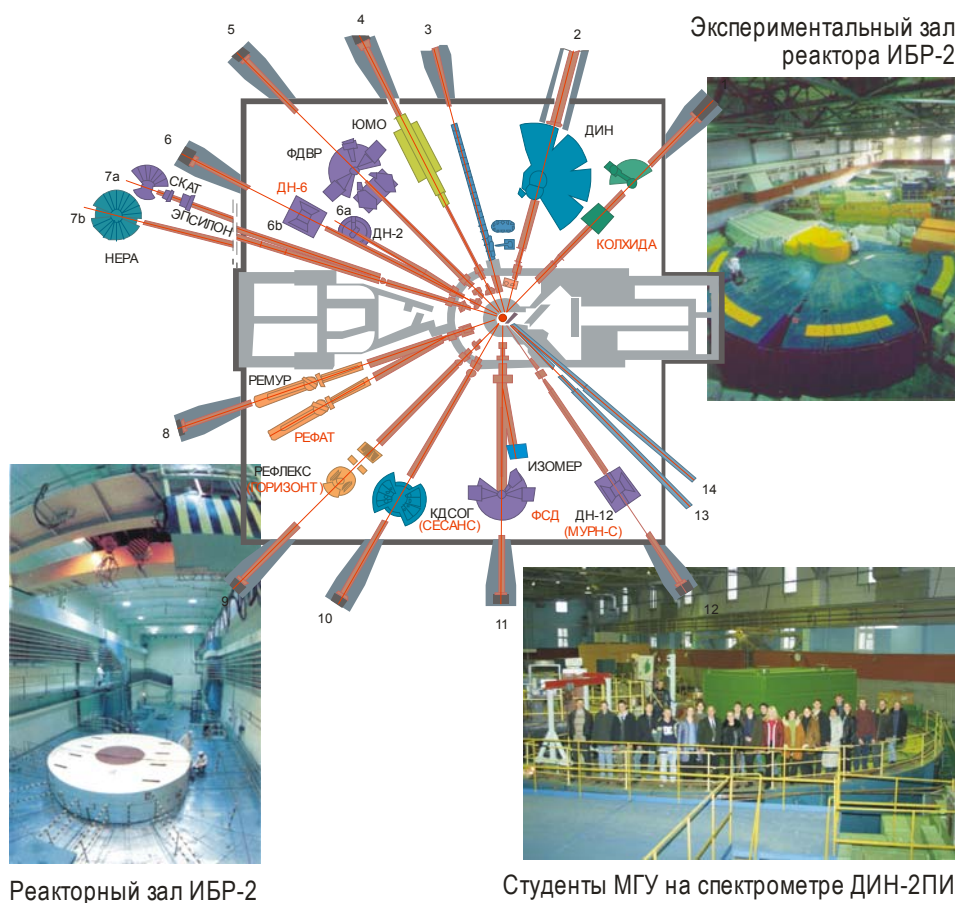
Россия как страна-участница проводит исследования с использованием нейтронов в двух международных научных организациях: Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Московской области) и в Институте им. Лауэ–Ланжевена (Гренобль, Франция). Данные об источниках нейтронов ОИЯИ и ИЛЛ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики реакторов международных центров, в которых Россия является страной-участницей

Название установки	Место-расположение	Год пуска	Мощность МВт	Поток нейтронов 10^{14} н/см ² /сек	Кол-во приборов
Реактор ИБР-2 (импульсный)	Дубна, ОИЯИ	1984	2 (средняя) 1500 (в импульсе)	0.5 (средний) 100 (в импульсе)	12
Реактор HFR	Гренобль ИЛЛ	1972	58	10	39

Импульсный высокопоточный реактор ИБР-2

Реактор ИБР-2 ОИЯИ обладает наибольшим в мире импульсным потоком нейтронов, достижимым на исследовательских источниках нейтронов (10^{16} н/см²/с), и является единственным современным источником нейтронов мирового класса для исследований конденсированных сред на территории России. На приборной базе реактора ИБР-2 учеными из России и других стран ежегодно проводится около 150 экспериментов по исследованию наносистем и материалов. В настоящее время на реакторе ИБР-2 функционирует 12 уникальных спектрометров мирового класса, позволяющих эффективно решать поставленные задачи по изучению наносистем и материалов в России методами рассеяния нейтронов. Среди них – фурье-дифрактометр высокого разрешения, дифрактометр для исследования микрообразцов, рефлектометры поляризованных и неполяризованных нейтронов, фурье-стресс-дифрактометр, текстурный дифрактометр, спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов, спектрометры неупругого рассеяния нейтронов. Опыт эксплуатации реактора ИБР-2 показывает, что это весьма эффективный источник нейтронов, в большинстве областей применений не уступающий лучшим источникам на базе протонных ускорителей. Этот опыт особенно актуален в настоящее время, когда наблюдается все больший интерес к импульсным источникам нейтронов с большой длительностью импульса.



Спектрометры реактора ИБР-2

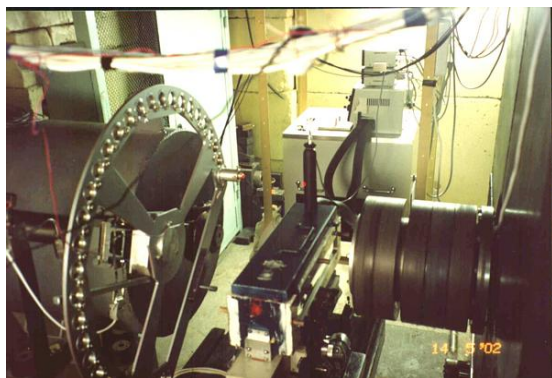
№	Спектрометр	Полное название спектрометра
1.	ДИН-2ПИ	Спектрометр неупругого рассеяния прямой геометрии
2.	ЮМО	Спектрометр малоуглового рассеяния
3.	ФДВР	Фурье-дифрактометр высокого разрешения
4.	ДН-2	Высокоинтенсивный дифрактометр общего назначения
5.	СКАТ	Текстурный дифрактометр
6.	ЭПСИЛОН	Дифрактометр для исследования внутренних напряжений
7.	НЕРА	Спектрометр неупругого рассеяния обратной геометрии
8.	РЕМУР	Рефлектометр поляризованных нейтронов
9.	РЕФЛЕКС	Рефлектометр неполяризованных нейтронов
10.	КДСОГ	Спектрометр неупругого рассеяния обратной геометрии
11.	ФСД	Фурье-стресс-дифрактометр
12.	ДН-12	Спектрометр для исследования микрообразцов



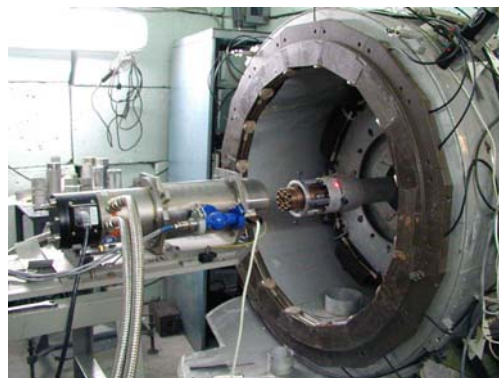
Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР



Фурье-дифрактометр высокого разрешения



Спектрометр малоуглового рассеяния нейтронов
ЮМО



Спектрометр для исследований микрообразцов при
высоких давлениях ДН-12

Спектрометры реактора ИБР-2

С 1997 года Россия является полноправным участником Европейского нейтронного центра – **Института Лауэ–Ланжевена (ИЛЛ)** в Гренобле, Франция. С одной стороны, активное и успешное участие российских специалистов в экспериментах на высокопоточном реакторе ИЛЛ наглядно демонстрирует лидирующие позиции российских нейтронных исследований в мире. Однако, с другой стороны, это показывает и острую нехватку собственных источников нейтронов, и недостаточное развитие приборной и методической базы нейтронных исследований в России. Использование реактора ИЛЛ российскими пользователями происходит следующим образом: 35% времени занимают эксперименты по ядерной физике и 65% – исследования конденсированных сред.

Сейчас в Гренобле российские ученые при очень жесткой конкуренции получают в среднем по всем направлениям около 6% распределяемого пучкового времени (при финансовой квоте России в 2,1%). Практически каждый год среди лучших работ, выполненных в ИЛЛ, присутствуют работы российских ученых.

В 2007 г. истекает срок действия соглашения Минатом России – Институт Лауэ–Ланжевена. Если новое соглашение с ИЛЛ не будет утверждено на новый срок, дефицит нейтронных источников и вопрос проведения передовых нейтронных исследований в области наносистем и материалов российскими учеными резко обострится.



Институт Лауэ–Ланжевена

в) Перспективы развития

Реакторный комплекс ПИК

Исследовательский реактор ПИК создается в Петербургском институте ядерной физики (ПИАФ РАН) в Гатчине. Реактор готов сегодня на 80–85%. Международная экспертиза, проведенная в 1993 году, подтвердила, что это проект мирового класса, отвечающий современным требованиям эксперимента.

Как было отмечено в решении Научно-технического совета Минатома России, проходившего 21 октября 2003 г., «реактор ПИК по своим параметрам и экспериментальным возможностям отвечает высшим мировым стандартам. По конструкции, физическим и техническим характеристикам он остается непревзойденным в реакторостроении для экспериментальных целей и после пуска станет уникальной базой научных исследований в России».



Комплекс реактора ПИК

Реактор ПИК мощностью 100 МВт, с потоком нейтронов $5 \cdot 10^{15}$ н/см²·с со своими экспериментальными установками мог бы стать национальным центром нейтронных исследований в России, основой чему служит высокий научный профессионализм коллектива ПИАФ, наличие высокотехнологической производственной базы и необходимой инфраструктуры для организации работы пользователей нейтронных пучков. Максимальное количество позиций для экспериментальных установок на пучках в залах реактора может достигать 50. В настоящее время уже проработаны проекты и начато создание 20 спектрометров для исследования наносистем и материалов методами рассеяния нейтронов.

Источник ИН-06

Перспективы развития и поддержания нейтронных исследований в России связаны также с предстоящим введением в эксплуатационный режим создаваемого в ИЯИ РАН (г. Троицк) нейтронного комплекса, включающего в себя импульсный источник нейтронов ИН-06, который является прототипом нейтронных источников нового поколения, спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100 и времяпролетный нейтронный спектрометр на базе установки РАДЭКС (ловушки пучка).



Нейтронный комплекс ИЯИ РАН

Физический пуск ИН-06 и РАДЭКС осуществлен в конце 1998 г. Импульсный источник медленных и быстрых (испарительных) нейтронов ИН-06 для нейтронных исследований по физике конденсированных сред и ядерной физике основан на использовании импульсного протонного пучка из ускорительно-накопительного комплекса мезонной фабрики ИЯИ РАН и вольфрамовых мишеней. Потенциально ИН-06 представляет собой два независимых источника нейтронов, расположенных в двух боксах, из которых пока используется только один. Завершение сооружения и ввод в научную эксплуатацию импульсного источника нейтронов ИН-06 с необходимыми параметрами пучка протонов на входе и соответствующей инфраструктурой для проведения исследований по физике конденсированных сред, нанотехнологий и др. можно разделить на две очереди.

Первая очередь, реализация которой запланирована на 2007–2009 гг., включает:

- достижение требуемых технических характеристик протонного пучка,
- завершение сооружения 8 каналов нейтронов от первого бокса, включая три времяпролетных канала длиной по 30 м с павильоном для экспериментальных установок,
- завершение сооружения канала транспортировки протонов ко второму боксу источника ИН-06, создание на базе второго бокса источника холодных и ультрахолодных нейтронов с зеркальными нейтронводами,
- завершение сооружения и ввод в эксплуатацию здания для физиков-экспериментаторов с возможностью размещения пользователей на время проведения экспериментов.

Вторая очередь, реализация которой запланирована на 2010-2012 гг., включает:

- дальнейшее улучшение параметров протонного пучка,
- завершение сооружения накопителя-группирователя, что позволит увеличить интенсивность импульсных потоков нейтронов на 2–3 порядка,
- создание экспериментальных установок на каналах второго бокса источника ИН-06 для проведения исследований с холодными и ультрахолодными нейтронами.

При модернизации сильноточного линейного ускорителя протонов Московской мезонной фабрики на основе частичной замены ускоряющей структуры сверхпроводящими резонаторами, повышения конечной энергии протонов до ~ 1 ГэВ и замены мишени на жидкометаллическую источник нейтронов ИН-06 мог бы приблизиться по своим параметрам к нейтронным комплексам, проектируемым в США, Японии и Европе.

Импульсный высокопоточный реактор ИБР-2М

Реактор ИБР-2, сданный в эксплуатацию в 1984 г., успешно отработал на физический эксперимент более 22 лет. В 2006 г. будет полностью выработан установленный проектом ресурс реактора ИБР-2 (корпус реактора, активная зона, система управления и защиты). В связи с этим начиная с 1996 г. в ОИЯИ осуществляется программа модернизации ИБР-2, нацеленная на замену основного реакторного оборудования, повышение безопасности и эксплуатационной надежности и улучшение основных параметров установки.

После завершения модернизации ИБР-2 будет создан новый модернизированный реактор ИБР-2М. Новый реактор ИБР-2М будет иметь в 1.5 раз больший поток тепловых нейтронов, более долговечный (в 2.5 раза) ресурс подвижного отражателя, втулочные твэлы с увеличенной глубиной допустимого выгорания, усовершенствованную систему аварийной защиты и новый современный комплекс замедлителей (теплых и криогенных). Комплекс замедлителей на модернизированном реакторе ИБР-2М позволяет повысить эффективность использования нейтронов в экспериментах на выведенных пучках до 20 – 30 раз. Это, в свою очередь, открывает возможности для создания мощной спектрометрической базы для проведения исследований по физике конденсированного состояния и удержания лидирующих позиций России в мировой науке в XXI веке. Средняя плотность потока холодных нейтронов на поверхности каждого из криогенных замедлителей комплекса реактора ИБР-2М будет не менее $9 \cdot 10^{11}$ н/см²/с (примерно столько же, сколько будет давать холодный замедлитель создаваемой «второй» мишени английского источника ISIS, который афишируется как рекордный).

Таким образом, после 2010 г. в России снова начнет работать модернизированный источник нейтронов – реактор ИБР-2М с рекордным импульсным потоком $2 \cdot 10^{16}$ н/см²/с и большим ресурсом по основному оборудованию. Будут существенно расширены возможности пользователей за счет применения холодных замедлителей. Все это позволит новому реактору ИБР-2М сохранять после 2010 г. в течение 20–25 лет лидирующие позиции среди нейтронных источников в мире.

4. Стратегия развития

Дальнейшее развитие нейтронных и синхротронных исследований в России, как и в мире, связано с развитием синхротронных и нейтронных источников, их экспериментальной базы и центров коллективного пользования на их основе, расширением круга ученых и специалистов в научных и промышленных центрах, высших учебных заведениях, использующих нейтронное и синхротронное излучение для исследования наносистем и материалов.

Стратегия развития состоит в следующем:

1. Концентрация сил и средств на минимально необходимом числе приоритетных проектов, имеющих стратегическое значение для сохранения лидирующих научных позиций в мире.
2. Проведение научных исследований по самым актуальным проблемам в области наносистем и материалов, физики конденсированных сред, химии, биологии, наук о Земле, материаловедения, инженерных наук. Привлечение более широкого круга ученых из этих областей естествознания к использованию уникальных возможностей синхротронных и нейтронных центров. Получение фундаментальных и прикладных результатов и выработка рекомендаций для практических применений.
3. Модернизация УНК КИСИ (РНЦ КИ, Москва) с целью доведения его параметров до источника СИ третьего поколения, увеличение числа каналов СИ, оснащение экспериментального зала станциями; строительство и оснащение второй очереди экспериментального зала.
4. Модернизация самого мощного в мире исследовательского импульсного реактора ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна), создание нового комплекса тепловых и криогенных замедлителей, развитие экспериментальной базы.
5. Модернизация комплекса ускорителей ИЯФ СО РАН (Новосибирск).
6. Совершенствование уникальной экспериментальной базы спектрометров для наиболее эффективного проведения исследований на главных источниках СИ и нейтронов России, играющих роль центров коллективного пользования: КИСИ (РНЦ КИ, Москва), комплекса ускорителей ИЯФ СО РАН (Новосибирск), ИР-8 (РНЦ КИ, Москва), ВВР-М (ПИЯФ РАН, Гатчина), ИВВ-2М (ИРМ, Заречный), ИРТ (МИФИ, Москва).
7. Завершение работ по вводу в эксплуатацию источника СИ в Зеленограде (ИФП): окончание строительства, ввод в эксплуатацию, оснащение экспериментальными станциями.
8. Завершение строительства реактора ПИК (ПИЯФ РАН, Гатчина).

- 9.** Реализация проекта МАРС (ИЯФ СО РАН): проект, строительство, оснащение станциями.
- 10.** Создание минимально необходимого числа спектрометров на строящихся источниках нейтронов – реакторе ПИК ПИЯФ РАН и источнике ИН-06 ИЯИ РАН. Организация центров коллективного пользования на базе этих источников.
- 11.** Подготовка кадров высокой квалификации, интеграция науки и высшего образования.
- 12.** Развитие взаимодействия с промышленностью.
- 13.** Укрепление позиций в международном научном сообществе.
- 14.** Активное использование возможностей страны-участницы в международных научных центрах ОИЯИ и ИЛЛ.

Программные мероприятия до 2012 г.

Задачи:

1. Эффективно использовать имеющееся оборудование.
2. Довести до совершенства приборный парк на работающих источниках.
3. Завершить строительство перспективных источников.
4. Разработать проекты новых перспективных источников и при благоприятных условиях начать их создание.

ПЕРВЫЙ ЭТАП: 2007 – 2009 гг.

а) Источники СИ

Источник	Виды работ	Стоимость, млн. руб.
КИСИ РНЦ КИ	1. Оснащение экспериментального зала станциями.	250
	2. Проект 2-й очереди экспериментального зала.	15
	3. Строительство 2-й очереди экспериментального зала.	572
	4. Модернизация источника СИ	900
Сибирский центр синхротронного излучения ИЯФ СО РАН	1. Модернизация источника СИ путем замены устаревшего ВЭПП-3 на современный компактный накопитель. 2. Конструкторская документация. 3. Строительные работы. 4. Изготовление и запуск систем. 5. Разработка, изготовление и запуск новых станций.	1200
ТНК Зеленоград	1. Окончание строительства. 2. Создание экспериментальных станций.	450
МАРС ИЯФ СО РАН	1. Завершение 2-й очереди Новосибирского ЛСЭ и моделирование основных процессов в многооборотном УР на ее базе.	200
	2. Полномасштабный проект МАРС и конструкторская документация.	600
	3. Организация инфраструктуры.	800
	4. Изготовление оборудования для ускорителя, запуск систем.	2000
ИТОГО:		6987

б) Источники нейтронов

Источник	Виды работ	Стоимость, млн. руб.
ИР-8	1. Модернизация реактора.	300
РНЦ КИ	2. Модернизация комплекса спектрометров.	450
ИБР-2	1. Создание комплекса холодных замедлителей.	45
ОИЯИ	2. Модернизация спектрометров и создание новых.	170
ПИК	1. Завершение строительства реактора.	3000
ПИЯФ	2. Создание спектрометров в экспериментальном зале.	1300
ВВР-М	1. Замена отдельных узлов реактора ВВР-М для обеспечения его эксплуатации.	30
ПИЯФ	2. Создание фабрики холодных и ультрахолодных нейтронов.	400
ИБВ-2М	1. Модернизация реактора: модернизация системы управления защиты (СУЗ) реактора ИБВ-2М.	70
ИРМ	2. Модернизация комплекса дифрактометров: оснащение существующих дифрактометров системами регулировки и поддержания температуры образца в криогенном (2,5–100 К) диапазоне. Системы разрабатываются на основе гелиевых криогенераторов.	20
ИФМ УрО РАН		
ИРТ	Модернизация комплекса спектрометров.	30
МИФИ		
ИН-06	Ввод в научную эксплуатацию с мощностью в пучке до 100 кВт и сооружение накопителя-группирователя	290
ИЯИ РАН		
ИН-10	1. Проект нового ускорителя протонов на энергию не менее 1 ГэВ.	
ИЯИ РАН	2. Проект новой размножающей мишени.	100
	ИТОГО:	6205

ВТОРОЙ ЭТАП: 2010 – 2012 гг.

а) Источники СИ

Источник	Виды работ	Стоимость, млн. руб.
КИСИ РНЦ КИ	Создание станций на 2-й очереди экспериментального зала.	500
ТНК Зеленоград	1. Создание экспериментальных станций. 2. Корпус специальной технологии с оборудованием	2300
МАРС ИЯФ СО РАН	1. Строительство источника: продолжение изготовления оборудования для ускорителя, запуск систем и источника СИ в целом, продолжение строительно-монтажных работ	5100
	2. Создание экспериментальных станций.	300
ИТОГО:		8200

б) Источники нейтронов

Источник	Виды работ	Стоимость, млн. руб.
ИР-8 РНЦ КИ	1. Модернизация реактора.	300
	2. Модернизация комплекса спектрометров.	150
ИБР-2 ОИЯИ	1. Создание комплекса холодных замедлителей.	15
	2. Модернизация спектрометров и создание новых.	145
ВВР-М ПИЯФ	1. Замена отдельных узлов реактора ВВР-М для обеспечения его эксплуатации.	20
	2. Создание фабрики холодных и ультрахолодных нейтронов.	100
ПИК ПИЯФ РАН	1. Завершение строительства нейтроноводного зала, криогенных и обеспечивающих систем.	1500
	2. Создание спектрометров в нейтроноводном зале.	1000
ИВВ-2М ИФМ УрО РАН	1. Модернизация комплекса спектрометров.	20
	2. Создание гелиевого облучательного канала в активной зоне реактора..	20
ИРТ МИФИ	Модернизация комплекса спектрометров.	30
ИН-06 ИЯИ РАН	Увеличение мощности до 200 кВт. Завершение сооружения и ввод накопителя-группирователя.	390
ИН-10 ИЯИ РАН	1. Строительство ускорителя.	790
	2. Строительство мишени.	
	3. Создание спектрометров.	
ИТОГО		4480

Ориентировочная суммарная стоимость (млн. руб.)

ПЕРВЫЙ ЭТАП 2007 – 2009 гг.

а) источники СИ	6987
б) источники НП	6205
в) исследования	300
ИТОГО	13492 млн. руб.

ВТОРОЙ ЭТАП 2010 – 2012 гг.

а) источники СИ	8200
б) источники НП	4480
в) исследования	300
ИТОГО	12980 млн. руб.

В оценки стоимости не включены эксплуатационные расходы и расходы на инфраструктуру, которые должны покрываться из средств организаций.

Заключение

Реализация предлагаемых программных мероприятий позволит создать на национальном уровне мощное объединение научных центров разного профиля на базе крупных исследовательских установок – источников синхротронного излучения и нейтронных пучков. Использование междисциплинарного подхода позволит обеспечить потребности в анализе структуры, функций и механизмов функционирования наноматериалов. Главная цель – преодоление раздробленности в науках о материалах и создание новой многоуровневой исследовательской и образовательной платформы для развития современных наноматериалов и нанотехнологий.

Научный редактор

профессор В.Л.Аксенов,
заместитель председателя Научного совета Роснауки по использованию синхротронного излучения и нейтронов в нанонауках и материаловедении, первый заместитель директора на научной работе Российского научного центра «Курчатовский институт»

Рабочая группа

к.ф.-м.н. М.В.Авдеев (ОИЯИ)
д.ф.-м.н. П.А.Алексеев (РНЦ КИ)
И.О.Гончарова (ОИЯИ)
к.ф.-м.н. Д.П.Козленко (ОИЯИ)
д.ф.-м.н. Э.Х.Мухамеджанов (РНЦ КИ)
к.ф.-м.н. Э.М.Пашаев (РНЦ КИ)

Оформление

Ю.И.Емелина (ОИЯИ)