

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН



**ОТЧЁТ СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА 2003 ГОД.**

НОВОСИБИРСК - 2004

В настоящем отчете в краткой форме изложены основные направления и результаты деятельности Сибирского центра синхротронного излучения в 2003 году. Описаны существующие и разрабатываемые экспериментальные станции на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3, обсуждаются результаты исследований, проведенных на этих станциях в 2003 году. Описаны результаты деятельности Сибирского центра СИ по направлениям: разработка и создание новой экспериментальной аппаратуры, создание специализированных накопителей – источников СИ и специальных генераторов СИ – вигглеров и ондуляторов, работы по лазерам на свободных электронах и созданию Сибирского центра фотохимии, сведения о коллективе и научном сотрудничестве Центра. В конце отчета помещен список публикаций с участием сотрудников Сибирского центра СИ, вышедших в 2003 году, и авторский указатель. Мы благодарны всем сотрудникам Сибирского центра и других организаций, предоставившим свои материалы для этого отчёта.

Редакторы–составители: В.Б.Барышев и К.В.Эпштейн.

СИБИРСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева 11 , ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН
Факс: (3832) 34 21 63 INTERNET <http://ssrc.inp.nsk.su>

Директор Центра, зам. директора Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН,
академик РАН **КУЛИПАНОВ Геннадий Николаевич**
Тел. (3832) 39 44 98 e-mail: kulipanov@inp.nsk.su

РУКОВОДИТЕЛИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИ:

ВИНОКУРОВ Николай Александрович, д.ф.–м.н., зав. лабораторией 8–1
Тел. (3832) 39 40 03
e-mail: vinokurov@inp.nsk.su

МЕЗЕНЦЕВ Николай Александрович, д.ф.–м.н., зав. сектором 8–12
Тел: (3832) 39 41 55
e-mail: mezentsev@inp.nsk.su

КОРЧУГАНОВ Владимир Николаевич, д.ф.–м.н., зав сектором 8–13
Тел. (3832) 39 42 38
e-mail: korchuganov@inp.nsk.su

Введение.

Сибирский центр синхротронного излучения организован на базе лабораторий Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Он является одним из основных мест проведения исследований с синхротронным излучением (СИ) и лазерами на свободных электронах (ЛСЭ) в России. Программа работ Сибирского центра синхротронного излучения в 2003 году включала в себя следующие направления:

- проведение исследований и разработка новых технологий с использованием синхротронного излучения накопителя ВЭПП–3, подготовка к проведению работ на ВЭПП-4М;
- создание экспериментального оборудования для работы с СИ (каналы, экспериментальные станции, рентгеновская оптика, монохроматоры, детекторы);
- разработка и создание ускорителей – специализированных источников СИ,
- разработка и создание вигглеров и ондуляторов;
- создание лазеров на свободных электронах и Сибирского центра фотохимии.
- обучение и профессиональная подготовка студентов и аспирантов.

В 2003 г. работы Сибирского центра СИ, помимо небольшого бюджетного базового финансирования, проводились за счёт:

- а) государственной научно–технической программы "Синхротронное излучение, лучевые применения";
- б) целевых программ Минпромнауки;
- в) российских источников: Интеграционные проекты СО РАН и РАН, Приборная комиссия СО РАН, гранты РФФИ, гранты Президента РФ, фонд Бортника;
- г) международных грантов (МНТЦ, ИНТАС, CRDF, NATO);
- д) доходов от работ, выполненных по договорам с организациями России;
- е) доходов от работ, выполненных по контрактам с организациями зарубежных стран (основной источник доходов):

1. Работа на накопителях ИЯФ СО РАН.

В 2003 г. работы на пучках СИ были сосредоточены на накопителе ВЭПП-3. На эксперименты с синхротронным излучением на ВЭПП–3 (включая совместную работу с “Дейтроном”) было выделено 2874 часа из 3672 часов общего полезного времени работы комплекса. В экспериментах на ВЭПП-3 были задействованы 11 станций на 7 каналах вывода СИ (Таблица 1). Работы на пучках СИ на ВЭПП-4М в 2003 г. не проводились в связи с проведением эксперимента по физике высоких энергий на низкой (1.5 ГэВ) энергии.

Таблица 1. Экспериментальные станции на пучках СИ из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН, на которых проводились работы в 2003 г.

0	LIGA–технология (работает).
0	“Взрыв” - изучение процессов детонации и свойств вещества при прохождении детонационного фронта (новая станция, работает).
2	Дифрактометрия с высоким разрешением и аномальное рассеяние (работает)
3	“Байкал” - рентгенофлуоресцентный элементный анализ–1 (работает).
4	Дифрактометрия в области 30 – 34 кэВ, дифрактометрия при высоких давлениях (работает).
5b	Дифрактометрия с временным разрешением – дифракционное “кино” (работает).
5c	Макромолекулярная кристаллография (работает).
5d	Неупругое рассеяние, малоугловое рассеяние (работает).
5f	Рентгенофлуоресцентный элементный анализ–2 (в процессе освоения)
7	Технический канал. Стабилизация положения пучка СИ (работает).
8	EXAFS–спектроскопия (работает).
10	Метрология и EXAFS-спектроскопия в мягком рентгеновском излучении (в процессе создания), исследования газовой десорбции под пучком СИ (работает).

Следует отметить некоторые новые, в том числе развиваемые только в Сибирском центре СИ, направления исследований. Следующим шагом в методике рентгенодифракционного кино и “in situ” исследований этим методом стала разработанная в последние годы в Сибирском центре СИ уникальная методика субмикросекундной дифрактометрии, которая позволяет изучать процессы детонации и поведения вещества в детонационном фронте. Другой развиваемый в СЦСИ новый метод - сканирующего рентгенофлуоресцентного анализа донных осадков озер для реконструкции состояния окружающей среды в прошлом. Этим методом получены, в частности, данные о климатических условиях в прошлом на отрезках от сотен до миллиона лет. Предложен и опробован новый метод измерения высокой температуры в процессах, идущих с выделением большого количества тепла, например, горение или СВС. Метод связан с использованием пробного кристаллика, помещенного внутри исследуемого образца, дающего дифракционное пятно в белом пучке СИ. Новое перспективное направление – создание и исследование наноструктур, самоорганизующихся или получаемых в процессах рентгеновской литографии. В прошедшем году, в частности, был разработан и опробован XAFS-метод исследования структуры германиевых квантовых точек на кремнии. Среди других работ можно упомянуть: исследования поверхности и структуры многослойных рентгенооптических элементов с использованием новой методики - рентгеновского диффузного рассеяния и XAFS-исследования новых катализаторов для холодных топливных элементов.

2. Основные результаты исследований на пучках синхротронного излучения.

2.1. Дифрактометрия с наносекундным временным разрешением. Исследования детонации и поведения вещества в детонационных процессах.

Рентгеновское излучение давно используется для исследования взрыва. Однако, низкая интенсивность рентгеновских трубок ограничивала возможности метода, и некоторые из задач оставались нерешенными. В частности, недостаток интенсивности не позволял исследовать распределение плотности позади фронта взрыва из-за слишком больших экспериментальных ошибок. Следующим шагом в методике “in situ” исследований этим методом стала разработанная в последние годы в Сибирском центре СИ уникальная методика субмикросекундной дифрактометрии, которая позволяет изучать процессы детонации и поведения вещества в детонационном фронте. Использование СИ изменило ситуацию – динамический диапазон измерения интенсивности, проходящей через образец, увеличился до 10^4 , и точность определения плотности улучшилась до 1%. Обработка полученных изображений аксиально-симметричных образцов позволила получать трехмерное распределение плотности за фронтом взрыва. Сравнение полученных экспериментальных результатов с гидродинамическим моделированием показало, что вычисления по принятой методике не учитывали много параметров и использовали ошибочные константы (рис. 1).

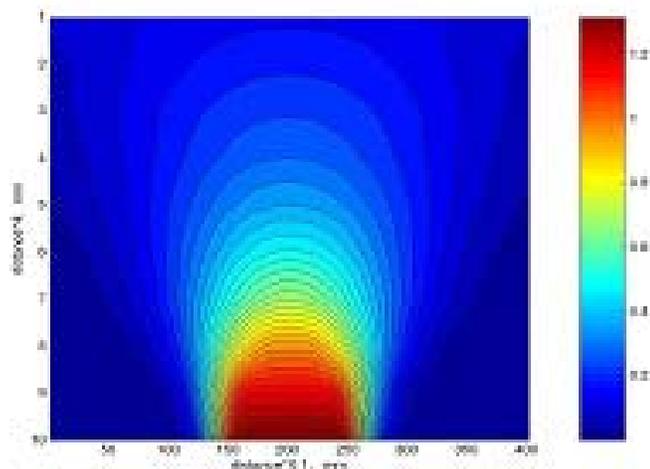


Рис. 1. Реконструкция 3-х мерного распределения плотности за фронтом детонации системы тротил-гексоген (50/50).

Исследования образования зародышей микротрещин при воздействии ударной волны на исследуемое вещество методом малоуглового рентгеновского рассеяния.

В качестве объекта исследования выбран полиметилметакрилат (ПММА - плексиглас), обладающий при интенсивных нагружениях комплексом разнообразных физических и механических свойств. В зависимости от условий нагружения этот материал может быть упругим, упруго-вязко-пластическим, упруго-хрупким. В последнем случае может происходить его разрушение в форме волны хрупкого разрушения, распространяющейся по сжатому образцу.

Измерения проводились с помощью записи интенсивности проходящего через образец рентгеновского луча, меняющейся с изменением плотности материала и 2) рассеянного,

малоуглового излучения. Нагружение цилиндрических образцов из ПММА высотой 10 мм с одного из торцов производилось взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ) ТГ 50/50 такой же формы, высотой 70 мм. Противоположный торец образца контактировал со стальным цилиндром длиной 20 мм. Диаметры всех элементов экспериментальной сборки 10 мм. Область наведения пучка СИ представляла собой прямоугольник 20 x 0.1 мм. Интенсивность проходящего и рассеянного излучения фиксировалась с помощью микрострипового детектора. Размер стрипов в направлении оси образца 0,1 мм, в экспериментах использовались 256 стрипа (канала).

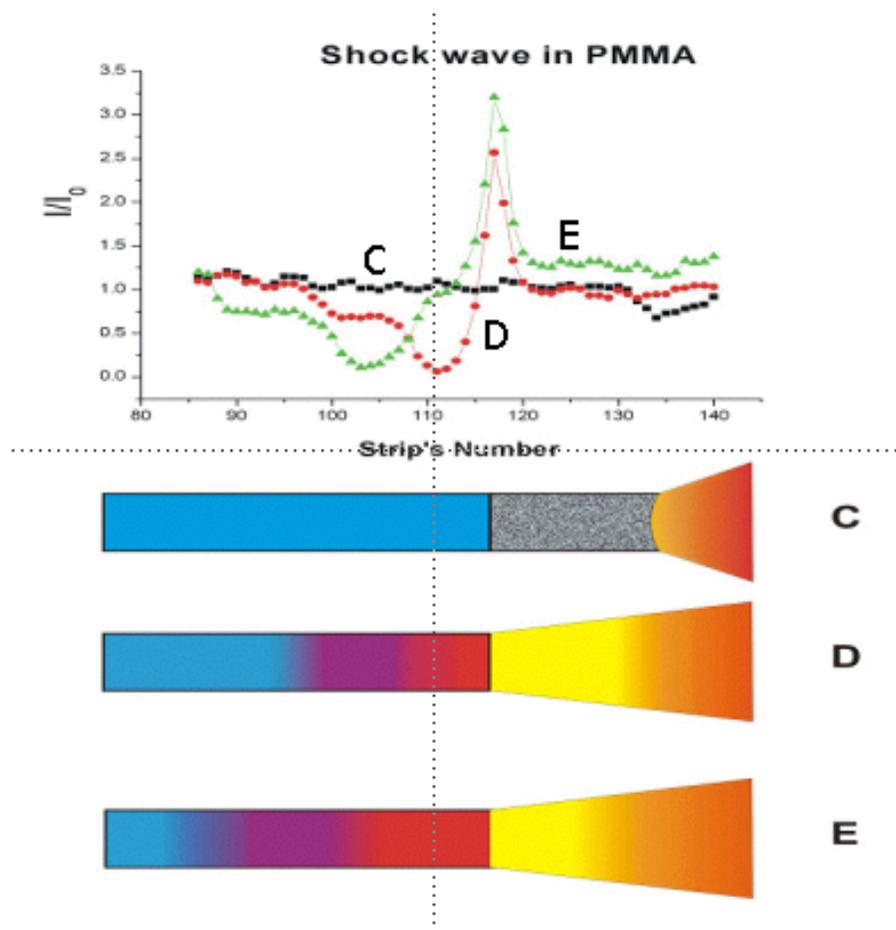


Рис. 2. Прохождение ударной волны по ПММА в разные моменты времени: С – волна проходит по взрывчатому веществу, D – волна вошла в образец, E – волна подошла к торцу образца. На каждой кривой интенсивности СИ наблюдается две волны сжатия ПММА, разнесённых на расстояние 1.2 мм. Обнаружено, что вторая волна сжатия дает интенсивное малоугловое рентгеновское рассеяние, свидетельствующее об образовании микротрещин ангстремных размеров. Ранее образование микротрещин наблюдалось только в волнах разгрузки.

Результат измерения интенсивности проходящего излучения (плотности материала) записывался в форме: 256 последовательных файлов зависимости изменения интенсивности от времени с интервалом измерений 0,25 мкс. На записи четко фиксируется сжатие во фронте

ударной волны (скачку интенсивности соответствует скачок плотности), за которым через некоторый промежуток времени следует волна разрушения. Далее следует увеличение интенсивности (уменьшение плотности), соответствующее разлету образовавшихся осколков в волнах разрежения.

Полученные данные позволяют провести количественные оценки параметров наблюдаемого процесса. Как следует из данных, в волне разрушения, следующей за ударной волной через 1,25 мкс, происходит дальнейший рост плотности. Эффект уплотнения хрупких материалов в волне разрушения известен, однако для ПММА, по-видимому, наблюдается впервые.

Полный профиль изменения плотности при прохождении УВ и волны разрушения, построенный по результатам измерений качественно соответствует профилю изменения напряжений в стекле, наблюдавшемуся в аналогичном процессе.

В момент прохождения УВ облучаемого пучком СИ участка наблюдается незначительное уменьшение малоуглового рассеяния. При подходе 2-й волны сжатия, ещё до волны разрушения фиксируется быстрое увеличение малоуглового рассеяния, амплитуда которого на порядок превышает фоновое значение (рассеяние от исходного образца). При подходе волны разрушения скорость нарастания МУРР уменьшается. Зафиксированная кривая малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) несёт информацию о размерах микротрещин и о динамике изменения их количества и размеров. В настоящее время ведётся математическая обработка полученных данных.

Впервые зарегистрирована динамика изменения во времени кривой распределения МУРР при детонации системы тротил-гексоген (Рис.3). Обработка кривых МУРР позволил восстановить динамику образования и роста частиц алмаза за детонационным фронтом. Обнаружено, что у ВВ различного диаметра динамика роста частиц различна – у ВВ малого диаметра частицы достигают размера 50 А за 500 нс, а при росте диаметра ВВ соответственно пропорционально возрастает и время нарастания роста частиц, хотя конечный размер частиц одинаковый и не зависит от диаметра ВВ.

Известно, что у прессованного ТЭНа величина сигнала МУРР минимальна. Она в несколько раз меньше, чем у ТГ 50/50 (сравнима с шумами). Поэтому представляет интерес проведение исследований именно с этим взрывчатым веществом в смеси со стеаратом серебра, чтобы выяснить, возможно ли образование металлического серебра в детонационной волне. Эксперименты проводились также с добавками тефлона и парафина. Тефлон в количестве 5% не влияет на сигнал МУРР. Такое же количество парафина увеличивает сигнал до заметной величины, а добавка 5% стеарата серебра ещё вдвое увеличивает МУРР. Кроме того, сигнал долго (более 15мкс) не спадает. Столь значительное возрастание интенсивности МУРР при добавке стеарата серебра позволяет с уверенностью утверждать, что в этом случае действительно образуются частицы металлического серебра, на которых и происходит МУРР. При контакте с воздухом металлическое серебро не окисляется, что свидетельствует об образовании защитного слоя на его поверхности. Это поведение необычно, так как мы исследовали поведение алюминиевых частиц микронных размеров за фронтом детонационной волны – они полностью сгорели. Даже частицы алмаза, образовавшиеся при взрыве сгорают полностью. Введённые во взрывчатку частицы алмаза также полностью сгорают.

По видимому металлические частицы серебра образуются при выходе из высокотемпературной зоны взрыва, и сразу покрываются защитной плёнкой углерода. Поэтому взаимодействие с кислородом не происходит как у частиц алюминия или алмаза, которые подвергаются воздействию максимальной температуры и кислорода.

Дифракционные и электронномикроскопические исследования продуктов детонации подтвердили наше предположение об образовании частиц серебра и аморфного слоя углерода на его поверхности (рис.4).

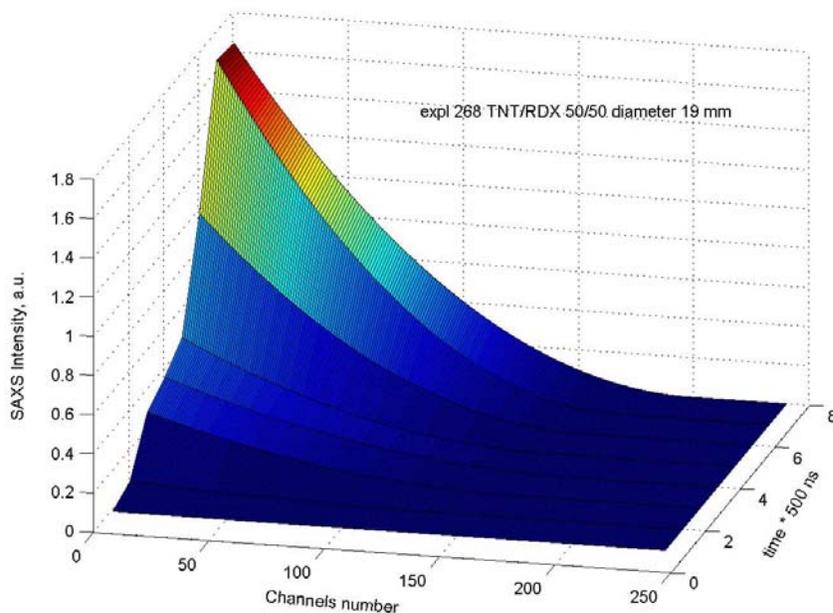


Рис.3. Поведение малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) от зоны химической реакции системы тротил-гексоген (50/50 диаметр 19 мм) во время взрыва. МУРР несёт информацию о динамике образования наночастиц алмаза.

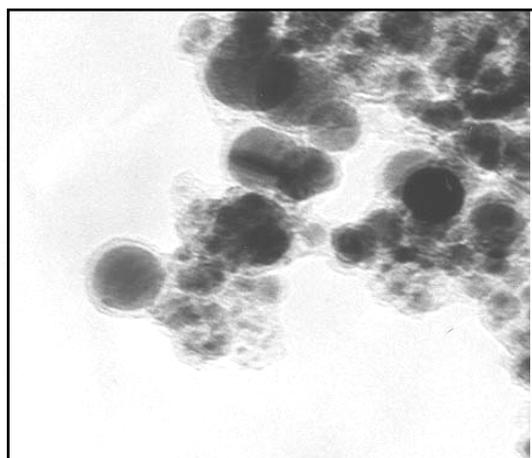


Рис.4. Образование капсулированных наноразмерных частиц серебра.

2.2. Исследование полупроводниковых сверхрешеток.

На станции “Дифрактометрия с высоким разрешением и аномальное рассеяние” исследована тонкая структура рентгеновского диффузного рассеяния вблизи отражения 002 и его сателлитов от AlAs/GaAs сверхрешетки. Были получены дифракционные карты рентгеновского рассеяния вблизи отражения (002) и его сателлитов от AlAs/GaAs

сверхрешетки, выращенной с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии на [001]-ориентированном кристалле GaAs. Полученные экспериментальные данные выявили наличие как квази-брэгговского рассеяния, вызванного конформным поведением границ раздела, так и особенностей, возникающих в том случае, когда, либо входной, либо выходной угол равен углу Брэгга. Наблюдаемая тонкая структура диффузного рассеяния объяснена в рамках борновского приближения искаженных волн. Тем не менее, показано, что это приближение не годится для количественного анализа диффузного рассеяния. В частности, показано, что наблюдаемое доминирование в интенсивности «входной» брэгговской особенности над «выходной» отражает темп распада когерентной волны в диффузный канал, сечение которого может быть сравнимо или превышать сечение когерентной дифракции. Результаты опубликованы в Acta Crystallographica (2003).

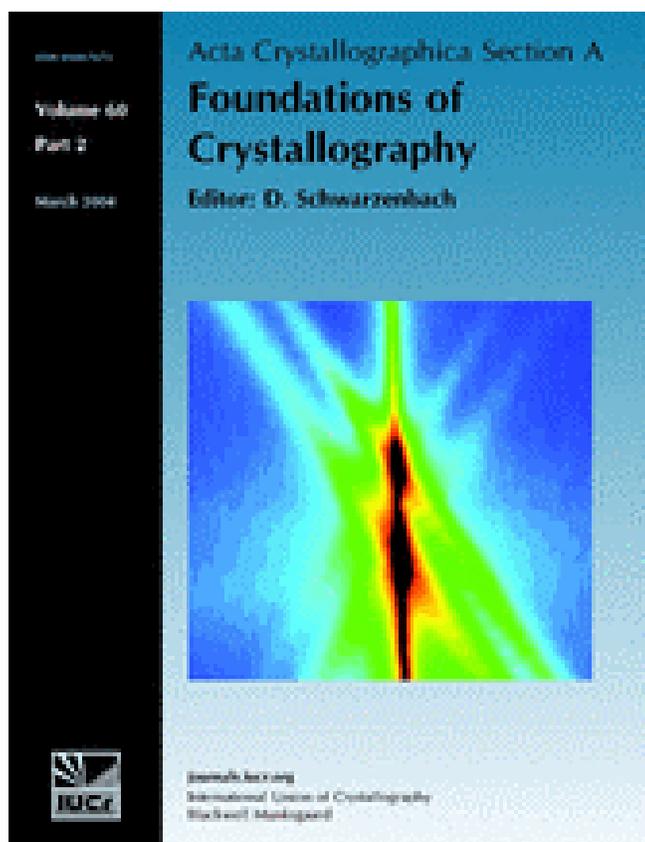


Рис. 5. Обложка журнала Acta Crystallographica (Section A. Foundations of Crystallography. Volume 60, Part 1, January 2003) с одной из картинок, демонстрирующих результаты исследований диффузного рассеяния рентгеновских лучей от AlAs/GaAs сверхрешетки на GaAs подложке.

2.3. Работы на станции «Дифрактометрия с высоким разрешением и аномальное рассеяние». Исследование формирования мезоструктурированных силикатных материалов.

Наряду с уже упомянутыми исследованиями тонкой структуры диффузного рассеяния, в 2003 году на станции «Аномальное Рассеяние» (канал вывода СИ №2) были выполнены

работы по исследованию:

1. Структуры и фазового состава тонких карбонитридных пленок с различными примесями, нанесенных на поверхность кремния. Пленки были получены методами ионно-плазменного напыления и химического осаждения из газовой фазы с использованием различных кремний-органических соединений-предшественников. Пленки используются в качестве материала для микроэлектроники.
2. Фазового состава исходных смесей взрывчатых веществ и продуктов детонационного синтеза. Работы проводились в рамках программы по исследованию поведения вещества в экстремальных условиях сверхвысоких температур и давлений.
3. Структуры и фазового состава смешанных оксидов, используемых в качестве катализаторов для процессов изотопного обмена.
4. Угловой зависимости интенсивности сигнала MLD (Magnetic Linear Dichroism). Образцы были приготовлены в Институте физики им. Киренского, г.Красноярск.
5. Структуры мезоструктурированных силикатов и каталитических систем на их основе. Синтезированные и исследованные материалы демонстрируют упорядоченное расположение мезопор нанометрового диапазона и могут быть использованы в катализе, фармакологии, оптике, микроэлектронике и т.д. Последнему вопросу уделим в данном отчете дополнительное внимание.

Мезоструктурированные материалы демонстрируют упорядочение структурных единиц – мезопор нанометрового диапазона – при возможном отсутствии дальнего порядка в атомной структуре. Синтез таких материалов производят смешением растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) как структурообразующих агентов и водорастворимых форм неорганических компонентов. Мезоструктурированные материалы (как правило, силикаты или алюмосиликаты) могут иметь гексагональную или кубическую упаковку мезопор, обладают чрезвычайно высокой удельной поверхностью и удельным объемом мезопор и могут быть использованы в различных областях науки и технологии, от химии и катализа до микроэлектроники и оптики.

Методами прецизионной дифрактометрии и дифрактометрии с временным разрешением были проведены исследования механизма формирования мезоструктурированных силикатных материалов с двумерно-гексагональной упаковкой мезопор на всех этапах синтеза. Показано, что образование мезоструктурированного композита «ПАВ–неорганический компонент» происходит сразу же после начала смешения реагентов. Уже на начальном этапе синтеза формируется продукт, структура которого не претерпевает каких-либо изменений со временем (Рис.6), меняется только степень поликонденсации силикатной стенки. Далее, при изменении кислотности среды происходит ускорение поликонденсации неорганического компонента, а последующая гидротермальная обработка способствует поликонденсации силиката по всему объему стенок материала.

По полученным данным проведено моделирование распределения электронной плотности в материале на всех этапах синтеза. Результаты моделирования свидетельствуют, что построение мезофазы происходит, по-видимому, по мицеллярному механизму, т.е. образующиеся в растворе ПАВ мицеллы при взаимодействии с раствором силиката покрываются слоем силиката, а конечный продукт формируется в виде упаковки таких силикатно-мицеллярных образований в двумерно-гексагональную структуру.

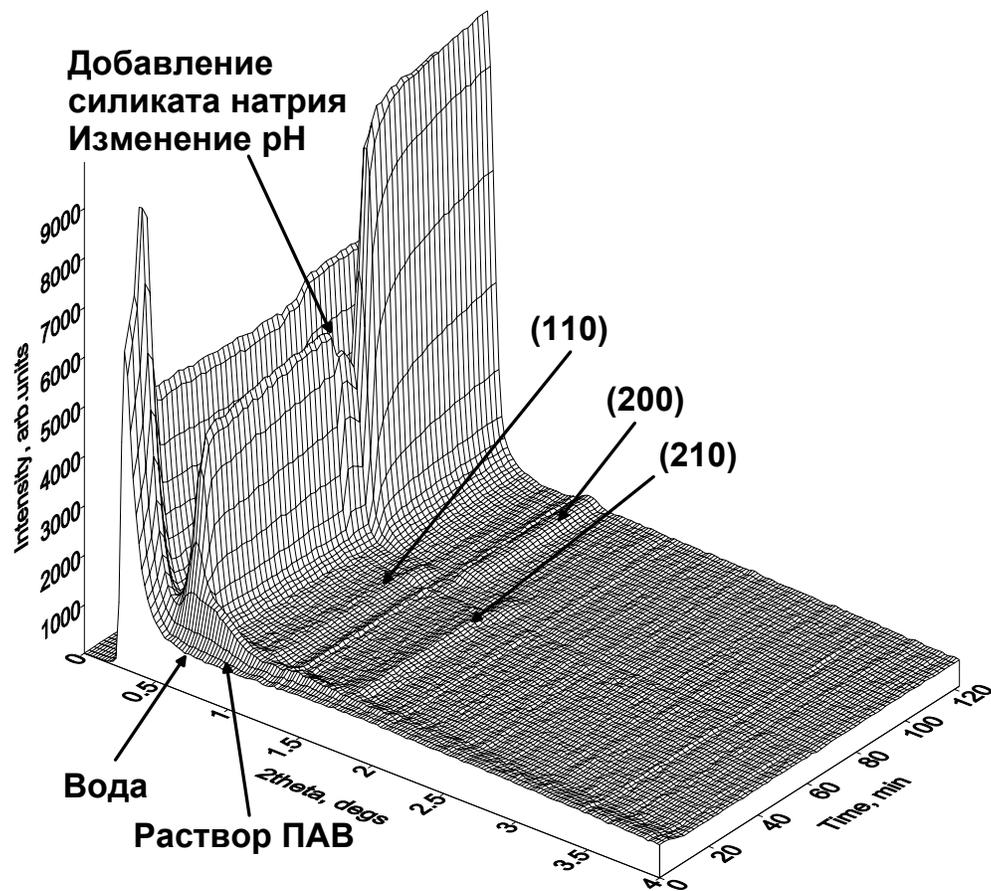
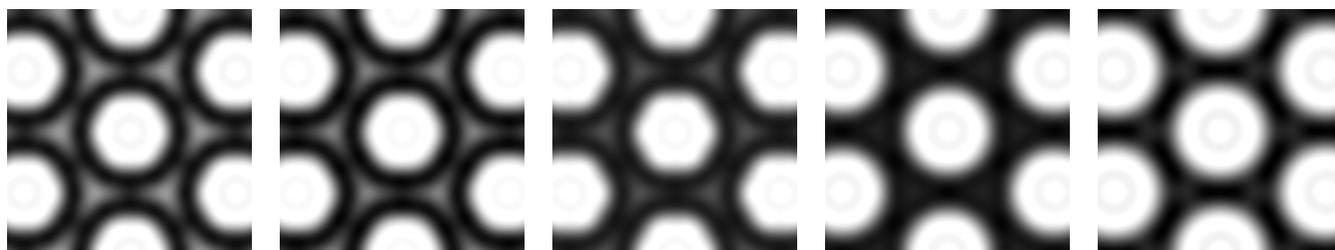


Рис.6. Синтез мезоструктурированного силиката типа SBA-15, двумерно-гексагональная упаковка, диаметр мезопор ~ 10 нм, толщина стенки ~ 3 нм.



а) первый этап, смешение исходных растворов

б) второй этап, добавление силиката натрия

в) старение продукта в течение 7 дней

г) гидро-термальная обработка

д) прокаливание

Рис.7. Моделирование структуры материала SBA-15 по полученным рентгенодифракционным данным.

2.4. Работы на станции дифрактометрии на 4-ом канале накопителя ВЭПП-3

Станция предназначена для проведения дифракционных исследований при энергии квантов 33.7 кэВ. За отчетный период на станции были проведены работы по изучению

реакций образования диффузионно-твердеющих сплавов на основе системы Cu-Ga; исследованию структуры газовых клатратов при высоких давлениях и работы по определению вида почечных камней *in vivo*.

Диффузионно-твердеющими сплавами или металлическими клеями называют составы, получаемые в результате взаимодействия одного металла или сплава в твердом состоянии с другим, находящимся в жидком состоянии. В результате диффузии происходит образование интерметаллического соединения, температура плавления которого превышает температуру плавления легкоплавкого компонента. Таким образом, смешивая металлический порошок и жидкий металл, получают пасту, которая с течением времени затвердевает. Такими диффузионно-твердеющими составами можно соединять различные материалы (металлы, стекло, керамику).

Нами изучались структурные превращения в ходе взаимодействия порошка из пересыщенного твердого раствора галлия в меди и галлий-оловянной эвтектики в виде расплава. В ходе исследований было обнаружено, что сразу же после смешивания компонентов начинается образование интерметаллида CuGa_2 , а появление олова рентгенографически определяется только после 3 часов взаимодействия. Было высказано предположение, что олово находится в метастабильном жидком растворе с галлием и когда концентрация галлия уменьшается до определенного предела начинается рост кристаллитов олова. Так как к этому моменту большая часть зерен интерметаллида уже образована, то олово может кристаллизоваться в виде межзеренных прослоек.

Одним из недостатков диффузионно-твердеющих сплавов является хрупкость получающихся интерметаллических соединений. Увеличение в составе диффузионно-твердеющего сплава доли пластичных оловянных прослоек должно было бы увеличить прочность соединений, получающихся с использованием диффузионно-твердеющих сплавов. Для увеличения в составе сплава доли олова был использован порошок из твердого раствора олова в меди (20 весовых процентов олова), полученный механо-химическим сплавлением компонентов.

Ход реакции изучался различными методами рентгеноструктурного анализа с использованием синхротронного излучения. Работы проводились в Сибирском центре синхротронного излучения на излучении от накопителя ВЭПП-3 Института ядерной физики СО РАН. При проведении данной работы использовались методики прецизионной дифрактометрии, дифракционного кино, Лауэ-дифрактометрии с использованием «белого» излучения и дифрактометрии с использованием жесткого рентгеновского излучения.

Как видно из дифрактограмм, наши предположения оправдались. Видно, что олово, в отличие от зерен интерметаллида, сильно текстурировано и вероятно находится в сплаве в виде деформированных монокристаллов. Съемка по методу Лауэ в полихроматическом излучении показала, что, в образце действительно присутствуют искаженные монокристаллические образования..

Повышение концентрации олова привело к увеличению прочности паянных соединений почти в два раза. В дальнейшем планируется перейти к созданию порошков с заданной структурой и составом. Данная работа выполнялась сотрудником ИХТТМ СО РАН Анчаровым А.И.

По данным некоторых исследований большая часть углеводородного сырья на планете находится в виде газогидратов. Разработка и эксплуатация газогидратных месторождений невозможна без данных о структуре и свойствах газогидратов. Изучалась структура газогидрата получающегося из газовой смеси 10 мол.% пропана и 90 мол.% метана. По имеющимся литературным данным, образованный этой смесью двойной гидрат кубической структуры II (КС-II) имеет состав близкий к $\text{C}_3\text{H}_8 \cdot 2\text{CH}_4 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$, что соответствует ситуации

когда все молекулы пропана располагаются в больших полостях каркаса КС-II, а молекулы метана – в малых. Порошковая дифрактограмма получена при давлении 400 атмосфер. Кроме нескольких слабых пиков (по всей вероятности, вызванных неполным поглощением первичного пучка в ловушке) все рефлексы индексируются на основе кубической ячейки с параметром $a = 17.255 \pm 0.003 \text{ \AA}$ (по 10 неперекрывающимся рефлексам), что соответствует ожидаемому для КС-II, либо гексагональной ячейки металлического бериллия с $a = 2.2789 \pm 0.0004 \text{ \AA}$, $c = 3.5730 \pm 0.0015 \text{ \AA}$ (по 3-м рефлексам, литературные данные $a = 2.2854 \text{ \AA}$, $c = 3.5844 \text{ \AA}$). Отклонения в параметрах элементарной ячейки бериллия от литературных данных могут быть вызваны либо систематической ошибкой в определении длины волны используемого рентгеновского излучения и расстояния образец – детектор, либо деформацией бериллиевой капсулы при ее механической обработке. Следует отметить, что литературные данные о структуре образованного данной смесью газов гидрата к кубической структуре II основывались на результатах экспериментов проведенных на замороженных при атмосферном давлении образцах, и наши результаты – первые, полученные *in-situ*.

Эти данные были получены с помощью новой ячейки для исследования порошковых дифрактограмм газовых гидратов при давлениях до 500 атмосфер. Основной конструкция ячейки является цилиндрическая бериллиевая капсула с толщиной стенок 2.5 мм и цилиндрическим каналом для образца диаметром 1 мм. Капсула помещена в массивную стальную оболочку с секторными прорезями (по 90°) для первичного пучка и дифрагированного излучения, и снабжена запорным вентилем.

Одна из экспериментальных задач, которые предполагается решить на данной ячейке – определение сжимаемости гидратов в области невысоких давлений. В связи с этим, было снята порошковая дифрактограмма этого же образца гидрата при давлении 175 атмосфер. Определенный при этих условиях параметр ячейки $a = 17.277 \pm 0.004 \text{ \AA}$ (для бериллия - $a = 2.2792 \pm 0.0004 \text{ \AA}$, $c = 3.5738 \pm 0.0018 \text{ \AA}$). При обработке результатов выяснилось, что разрешение имеющегося на станции детектора image-plate находится на пределе необходимого для подобных работ. Устанавливаемый в настоящее время на станцию новый детектор по всей вероятности поможет исправить ситуацию. Данная работа выполнялась сотрудниками ИНХ СО РАН А.Ю.Манаковым и В.А.Феклистовым.

При почечно-каменной болезни, в основном, образуются камни трех типов: уратные, оксалатные и фосфатные. Знание врачом состава почечного способствует правильному выбору методики лечения и профилактики образования новых камней .

В данной работе была предпринята попытка моделирования *in vivo* исследования методом рентгенофазового анализа камня в специальном модельном объекте-фантоме. Для этого почечный камень, полученный оперативным путем, у одного из исследователей размером 5x3x3 мм, помещался в биологическую ткань свиньи с большим содержанием жира. Для съемки использовалась схема на прохождение. Дифрагированное излучение регистрировалось запоминающим экраном (Imaging Plate). Использовались запоминающие экраны фирмы «Fuji».

Первоначально была получена дифракционная картина от почечного камня. Затем он был помещен в модельный объект-фантом и получена интегральная дифракционная картина. На рис.8 вверху показана дифрактограмма, полученная путем интегрирования по углу дифракции. Снизу приведен вид дифрактограммы от оксалата кальция одноводного (узеллит).

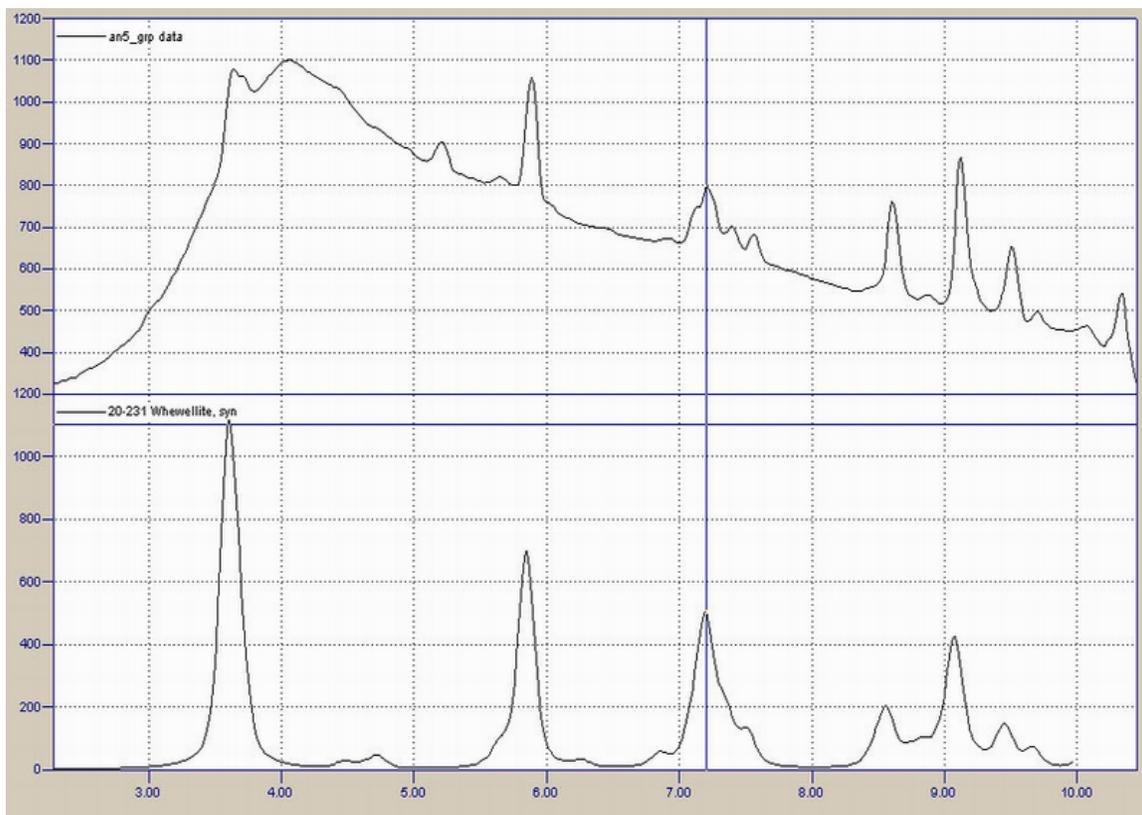


Рис.8. Вверху показана дифрактограмма, полученная путем интегрирования по углу дифракции. Внизу приведен вид дифрактограммы от оксалата кальция одноводного (узеллит).

Следует отметить, что в такого рода исследованиях нет необходимости проводить детальный анализ дифракционной картины, поскольку наиболее распространены почечные камни, относящиеся к трем основным группам (оксалаты, фосфаты, ураты). Известно, что дифрактограммы указанных групп камней сильно отличаются, и для уверенного отнесения исследуемого камня к одной из них соотношение сигнал/шум на дифрактограмме может быть ~ 10 .

Важно отметить, что при такой схеме получения дифрактограммы не стоит вопрос о точном позиционировании и фиксации объекта. Небольшие смещения камня во время съемки не ухудшают качества дифрактограммы, т.к. колебания камня в пространстве способствует усреднению дифракционной картины и добавляет рефлексы от микрокристаллитов, которые ранее не давали дифракции из-за своего пространственного положения.

Как видно, по полученной дифрактограмме можно уверенно определить вид камня. Экспозиция данной дифрактограммы была около 8 часов. По отношению сигнал/шум на дифрактограмме видно, что экспозиция может быть реально снижена в 20 раз. Область энергии квантов 33.7 кэВ находится на спаде спектральной характеристики накопителя ВЭП-3. Поэтому поток квантов в пучке составлял 0.7×10^8 фотонов в секунду. Для проведения диагностических процедур на реальном пациенте требуется поток рентгеновских квантов с энергией 50-60 кэВ интенсивностью 10^9 фотонов в секунду. Такой рентгеновский пучок может быть получен на выходе из специального устройства (виглера), повышающего интенсивность рентгеновских квантов на накопителе ВЭП-4 ИЯФ СО РАН при его работе с

электронами энергии 5 ГэВ и выше.

При профилактическом обследовании установленная доза рентгеновского облучения внутренних органов составляет 1-20 мЗв в зависимости от вида обследования. В наших экспериментах эффективная доза облучения не превышала 100 мЗв. Совершенно очевидно, что учитывая соотношение сигнал/шум в наших экспериментах, и время эксперимента и доза облучения могли бы быть снижены по крайней мере в 20 раз. В дальнейшем эффективная доза облучения может быть снижена за счет уменьшения экспозиции, а также повышения эффективности системы детектирования.

На основании полученных нами данных можно сделать вывод о возможности использования СИ для развития метода исследования состава почечных камней *in vivo*. Постановка подобных методик диагностики полностью укладывается в современные тенденции развития медицины в направлении создания медицины профилактической, когда диагноз устанавливается на возможно более ранних стадиях развития болезни.

Данная работа выполнена сотрудником ИК СО РАН Низовским А.И. и сотрудником ИХТТИМ СО РАН Анчаровым А.И.

2.5. Дифрактометрия с временным разрешением

На станции «Дифракционное кино» были проведены исследования процессов горения и отжига мехактивированных СВС-составов Ni+13%Al. Механическая обработка приводит к тому, что реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза данного состава проходит без образования жидкой фазы, в режиме т.н. «истинно твердофазного горения». Это обстоятельство обеспечивает отсутствие процессов кристаллизации продуктов из расплава и хорошую достоверность данных, получаемых однокоординатным детектором. Как видно из рисунка, синтез сопровождается образованием пока не установленной промежуточной фазы и конечного продукта – Ni₃Al. Медленный прогрев исходного состава также приводит к образованию конечного продукта. Анализ полуширины пика Ni показывает ее уменьшение в диапазоне температур от 170 до 240 С, что совпадает с первым пиком тепловыделения на кривой ДСК (дифференциальной сканирующей калометрии). Предполагается, что энергия, запасенная при механической активации в виде дефектов кристаллической решетки выделяется во время СВС, снижая температуру, необходимую для инициации процесса.

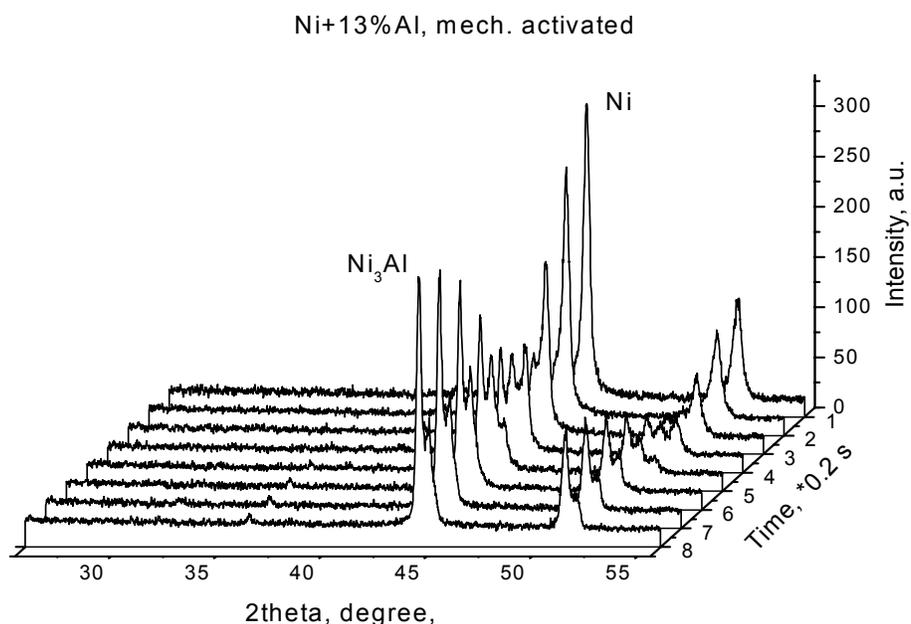


Рис.9. Кинетика фазообразования мехактивированных СВС-составов Ni+13%Al.

2.6. Рентгенофлуоресцентный элементный анализ.

В 2003 году на станции рентгенофлуоресцентного элементного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ) накопителя ВЭПП-3 произведен анализ элементного состава более 3000 образцов. К наиболее интересным работам, проведенным на станции, можно отнести анализ колонки глубоководных осадков LV28-40-5 из Охотского моря, охватывающей по времени последний ледниково-межледниковый цикл (80 тысяч лет). Осадки колонки проанализированы с разрешением от $\sim 50 - 500$ лет. Получены профили концентраций Cl, Ar, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ba, Pb, U, Th. В результате проведенных исследований установлена детальная предварительная хроностратиграфия осадков и показано, что за последние 80 тысяч лет аккумуляции осадков условия среды и региональный климат претерпевали как орбитально индуцированные изменения, так и быстрые и значительные осцилляции на тысячелетней шкале. Работа проводится в рамках интеграционного проекта СО РАН и ДВО РАН "Поиск быстрых климатических сдвигов на тысячелетней шкале за период последнего ледниково - межледникового цикла в осадках Охотского моря" совместно с Институтом океанографии ДВО РАН.

Помимо элементного состава, предполагается исследовать колонку на содержание биогенного кремнезема и карбоната кальция, литофизические параметры (магнитная восприимчивость, содержание частиц ледового разноса), минеральный состав (кварц, ПШ, кальцит, глинистая компонента и т.д.), изотопный состав кислорода раковин планктонных фораминифер, соленость поровых вод.

Работа с Институтом археологии и этнографии СО РАН продолжается. По материалам этих исследований сделан доклад на аналитической конференции в Германии, ARGUS-03, Гамбург, сентябрь 2003г. Вышла статья в журнале Археология этнография и антропология Евразии, 2004, Н.В. Полосьмак и др. "Волосы из пазырыкских могил (метод исследования —

рентгенофлуоресцентный анализ с использованием синхротронного излучения)". По результатам исследования можно предположить, что у пазырыкцев нередко случались отравления медью. Масштабы этого отравления зависели от широты распространения у них традиции вдыхать конопляные или иные пары над медной посудой под покрывалом из войлока или кожи ("скифская баня").

Судя по результатам анализа волос, дети меньше участвовали в "скифской бане" либо допускались к этому редко, поскольку в волосах мальчика (курган 2, Ак-Алаха-1) соотношение меди и цинка (около единице) соответствует началу в нарушении метаболизма в его организме. У современного человека, лошади и древней лошади отношение Cu/Zn в волосах имеет величину порядка 0.1, а у древних людей это отношение уже увеличивается от 1 до 23 единиц (Рис. 10).

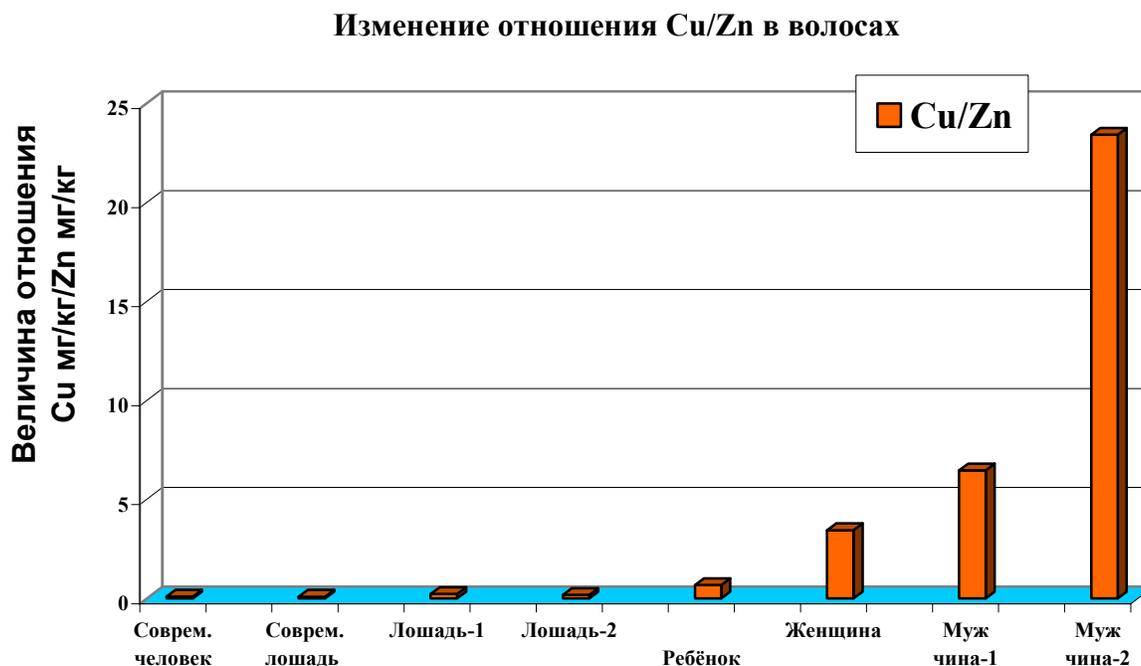


Рис. 10. Результаты сравнительного РФА-СИ элементного анализа волос человека и лошади из Пазырыкских захоронений и волос современного человека и лошади.

Нарушение отношений между жизненно важными элементами в организме человека является показателем состояния здоровья человека, и это просматривается по результатам данного исследования волос, которое характеризует обстановку, образ жизни и обычаи пазырыкцев. О том, что это (медное) отравление никак не связано со средой обитания, а только с человеческим фактором, могут свидетельствовать данные анализа шерсти лошадей, погребенных в Ак-Алахинских могильниках. Они показывают отсутствие в нарушении метаболизма (меди меньше цинка) в их организме. Причиной нарушения метаболизма, которая могла привести к смертельному исходу, было значительное увеличение меди и как следствие – уменьшение концентрации цинка. Эти различия в отношениях между Cu и Zn показаны на диаграмме.

2.7. Глубокая рентгеновская литография и LIGA-технология.

В 2003 году по тематике рентгеновская литография и LIGA-технология проводились следующие работы:

1. Разрабатывается технология прямого изготовления на пучке СИ трехмерных микроструктур в полимерном резисте (например, рентгеновские линзы). Для этого экспериментально исследовались режимы экспонирования и травления полиметиметакрилата (ПММА), для оптимизации процесса травления толстых резистивных слоев исследовалось влияние температуры, состава проявителя и режима проявления на скорость травления и качество получаемых структур. Исследовалась зависимость скорости растворения от дозы экспонирующего излучения в широком диапазоне доз (т.н. "характеристическая кривая");
2. Отрабатывались методики долговременного (часы, дни) прецизионного сканирования образца относительно рентгеновского микропучка СИ. Для этого исследовались параметры экспонирующего излучения – распределение мощности СИ в плоскости расположения образца с использованием калориметрического детектора и проволочного датчика положения пучка ПДПП. Проволочный датчик разработан для мониторинга непосредственно в процессе экспонирования на станции пучка СИ как от 3-полюсного вигглера (дублирование системы на 7-м канале), так и пучка из 11-полюсной литографической змейки (другой системы стабилизации пучка в настоящее время не существует).
3. Исследовались возможности прецизионного совмещения топологии формируемого микрорисунка с пучком при прерывании процесса экспонирования.

Ключевым элементом рентгеновской литографии являются рентгеновские шаблоны (маски) - рентгеноконтрастные матрицы с рисунком требуемого изделия. Традиционные методы изготовления планарных рентгеношаблонов для LIGA-технологии многоступенчаты и дорогостоящи, в настоящее время в России рентгеношаблоны не производятся, а их приобретение за границей — весьма дорого. Предполагается создать новую методику изготовления микроструктур, в том числе трехмерных, отличающуюся простотой и удобством от традиционной многоступенчатой технологии изготовления шаблонов. Так же эта методика позволит создавать планарные шаблоны для LIGA-технологии. В предлагаемой технологии интенсивный пучок СИ из накопителя ВЭПП-3 используется непосредственно для рисования требуемой топологии сразу в толстом слое рентгенорезиста, нанесенного на подложку. Локальный подбор экспонирующей дозы определяет глубину элементов рисунка. После травления облученных областей резиста и гальванического заполнения образовавшихся каналов рентгеноконтрастным материалом будет получен рентгеновский шаблон с толстым поглощающим слоем и с заданной топологией.

Экспериментальные работы проводятся на станции "LIGA" накопителя ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН). Источником СИ может быть по выбору 3-полюсный вигглер (магнитное поле 20 к Гс, $I_c = 2.3$ А) или 11-полюсная змейка (магнитное поле 0...10 к Гс, $I_c = 4.6...40$ А).

Преимущества рисования: не требуется технология многослойного нанесения, наносится всего один слой, нет проблем контраста промежуточного шаблона. Недостаток рисования - долгое время рисования, можно уменьшить, создав шаблоны элементов рисунка и мультиплицировав их.

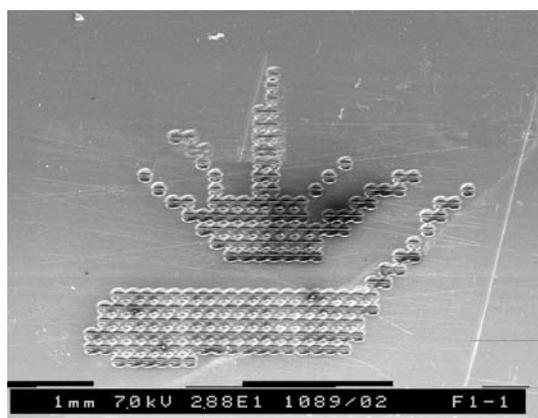


Рис. 11. Первый тестовый пропечаток рисунка по точкам в ПММА. Экспозиция отдельной точки ~20-40 сек, глубина 15 мкм. Общее время облучения ~2 часа

2.8. EXAFS-спектроскопия.

В 2003 году группой из ИК СО РАН на станции “EXAFS–спектроскопия” проведено большое количество совместных исследований с российскими и зарубежными (12 организаций) партнерами. Приведем только некоторые из них.

Продолжено “in situ” изучение промежуточных фаз реакции окисления метанола CH_3OH до H_2O и CO_2 (разработка низкотемпературного топливного элемента). Совместно с Институтом новейших технологий (Япония) проведено исследование in situ изменений структуры Pt электродов низкотемпературных топливных элементов при различных потенциалах. Совместно с Техническим университетом г. Мюнхен (Германия) исследовано in situ поведение Pt-Ru электродов низкотемпературных топливных элементов в реакции окисления метанола.

Разработан и опробован XAFS-метод исследования структуры германиевых квантовых точек на кремнии, получаемых методом эпитаксии молекулярного пучка (МВЕ) с отжигом до 300 С.

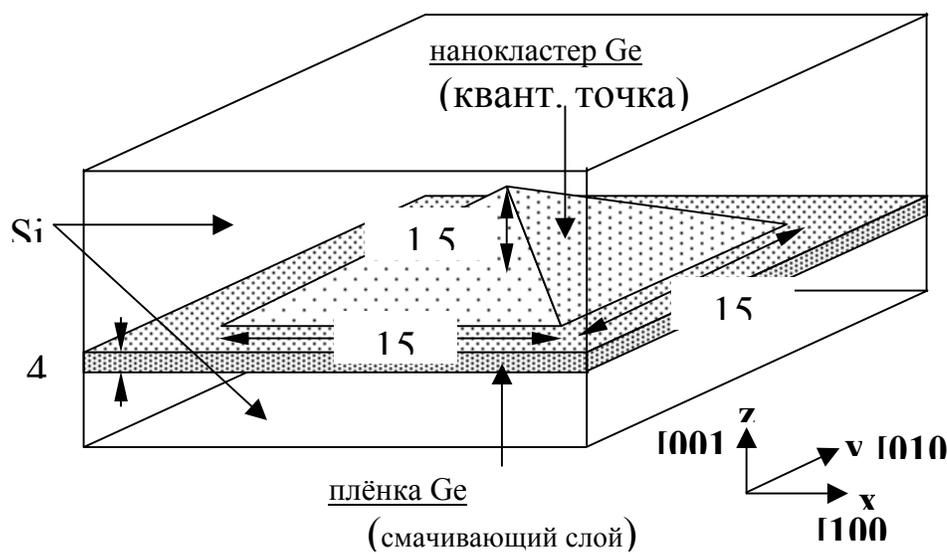


Рис.12. Схема пирамидального нанокластера (квантовой точки) Ge на Si

Развитие методик XAFS спектроскопии для определения параметров пространственной и электронной структуры квантовых точек. С использованием усовершенствованных поверхностно-чувствительных методик EXAFS спектроскопии определены параметры микроструктуры (межатомные расстояния, координационные числа и их анизотропия), установлена связь изменений этих параметров с морфологией германиевых квантовых точек (КТ) на Si(001), Si(111), ZnSe и предложены адекватные структурные модели (Рис.11). В частности, установлено, что межатомные расстояния Ge-Ge в КТ на 0.04 Å меньше, чем в массивном германии. Уменьшение межатомных расстояний иллюстрируется сдвигом осцилляций.

Из анализа данных XANES спектроскопии определены характеристики свободных электронных состояний. В частности, установлено присутствие свободных состояний на глубине порядка 0.4 эВ от потолка валентной зоны Ge для образцов, допированных бором. Установлено влияние состава подложки, ее ориентации, условий приготовления гетеросистем на микроструктуру и электронное строение квантовых точек. (Увеличение количества более длинных связей Ge-Ge по сравнению с количеством более коротких связей Ge-Si указывает на увеличение размеров германиевого ядра при изменении эффективной толщины структуры от 4 до 10 монослоев.)

3. Разработка и создание новой аппаратуры для экспериментов на СИ.

3.1. Детекторы для наносекундной дифрактометрии.

В 2003 году была реализована схема эксперимента, учитывающая саморазвертку в пространстве исследуемого процесса (детонационного, ударноволнового) и было получено временное разрешение до 15 нс, на порядок меньше временного интервала между банчами СИ из VEPP-3.

Важный компонент установки – рентгеновские детекторы. Их быстродействие и пространственное разрешение определяют возможности эксперимента. В ходе выполнения проекта были разработаны прототипы 3-х однокоординатных детекторов с наносекундным временным разрешением и проведены первые эксперименты на пучке СИ. В частности, использование однокоординатного детектора ОД-5-DIMEX позволило зарегистрировать двумерное распределение интенсивности прошедшего через образец излучения во время детонации. Обработка таких данных позволяет восстановить 3-х мерное распределение плотности за детонационным фронтом.

Временное разрешение детектора.

1. В связи с тем, что в используемом специализированном кристалле интегратор не позволяет организовать достаточно быстрый сброс накопленного заряда, режим регистрации вспышек СИ от каждого последовательного электронного сгустка не представляется возможным. Тем не менее режим регистрации каждой второй вспышки с маскированием промежуточной реализован и уверенно работает.
2. Для определения временного разрешения детектор DIMEX переводится в режим без сброса со временем переключения ячеек конвейера, равным половине интервала между последовательными вспышками СИ (~125 нс). При этом видно, что детектор разрешает лучше, чем 100 нс (Рис. 12) По оси абсцисс отложен номер ячейки конвейера, по оси ординат — величина регистрируемого сигнала в отсчетах АЦП

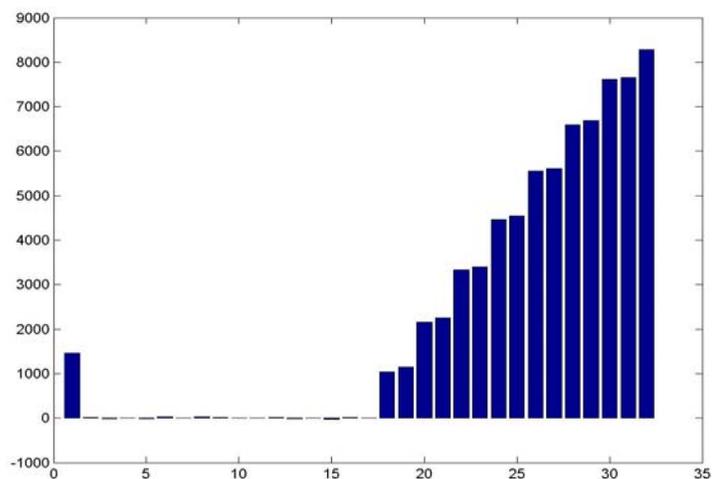


Рис.13. Пространственное разрешение детектора DIMEX.

По оси абсцисс отложен номер регистрирующего канала детектора, по оси ординат — величина регистрируемого сигнала в отсчетах АЦП. Пространственное разрешение (ширина на полувысоте) составляет <200 мкм.

3.2. Проект “Солнечный патруль”.

В 2003 году началась детальная разработка проекта по калибровке аппаратуры "Космического солнечного патруля" на синхротронном источнике, поддержанного МНТЦ (проект № 2500 - ГОИ им. С.И.Вавилова (Санкт-Петербург), ИЯФ СО РАН). Целью проекта является выполнение абсолютных калибровок аппаратуры "Космического солнечного патруля" разработки ГОИ с помощью СИ в широком спектральном диапазоне от 10 до 5000 эВ (2.5 – 1220 Å).

"Солнечный патруль" предназначен для постоянного мониторинга абсолютных потоков УФ и рентгеновского излучения Солнца в широкой области спектра от 10 до 9000 эВ. В настоящее время никакие из существующих или планируемых мониторингов солнечной активности по косвенным признакам (радиопоток, пульсации лимба, изображение диска в любом, включая коротковолновый диапазон) не дают информации об основном геоэффективном агенте излучательной активности Солнца и не позволяют контролировать количественные параметры солнечных вспышек – главного проявления солнечной активности. По этой причине до сих пор нет полных спектров вспышек в коротковолновом диапазоне (короче 1200 Å). Следовательно, нет исходных данных как для анализа влияния солнечных вспышек на земные процессы, так и для исследования механизмов самих вспышек и их прогнозирования, что является серьезным препятствием для развития солнечно-земной физики и солнечной астрофизики.

Необходимость создания патруля потока излучения Солнца в рентгеновском и УФ диапазонах для термосферно-ионосферных исследований была сформулирована в СССР еще 20 лет назад. Анализ попыток решить этот вопрос за первые 35 лет космической эры показывает, что эта задача продолжает оставаться чрезвычайно актуальной и ее решение сдерживается лишь методологическими и техническими трудностями. Проблема мониторинга абсолютных потоков ионизирующего солнечного излучения неоднократно ставилась перед космонавтикой и за рубежом как наиболее важная для исследования солнечно-земных связей, глобальных климатических изменений, термосферных и

ионосферных явлений. Однако, все текущие и планируемые программы за рубежом до сих пор не обеспечили решение данного вопроса. Пока возможное решение такой задачи Европа и США планируют на 2007-2011 годы. Поэтому эксперимент "Солнечный патруль" может стать флагом современных космических солнечных исследований.

Основной комплект аппаратуры "Солнечного патруля" включает в себя 5-и каналный ВУФ спектрометр (8 - 22 эВ), 3-х каналный рентгеновский спектрометр (20 - 700 эВ) и радиометр (10-9000 эВ). Предполагается, что после выполнения калибровок аппаратура будет доставлена и установлена на международной космической станции (МКС, Рис. 14, 15).

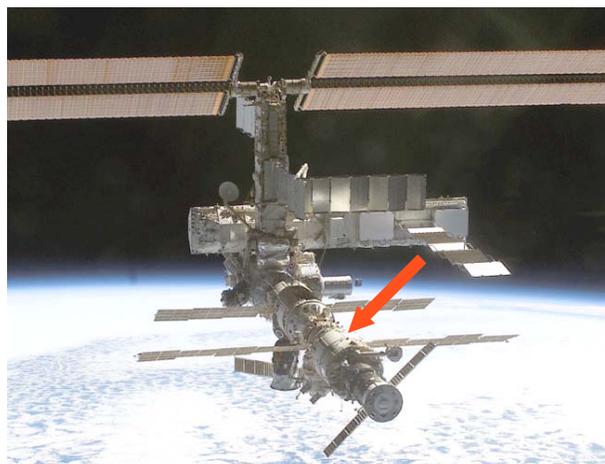


Рис.14. Предполагаемое расположение аппаратуры солнечного патруля на МКС



Рис.15. Основной комплект аппаратуры "Солнечного патруля" (без рентгеновского спектрометра)

На рисунках: часть основного комплекта аппаратуры "Солнечного патруля" (справа) и предполагаемое место размещения аппаратуры на МКС (слева).

Основными особенностями выполнения абсолютных калибровок "Солнечного патруля" на СИ являются очень широкий спектральный диапазон калибровок 10 – 5000 эВ (2.5 – 1220 Å), не очень высокие требуемые потоки фотонов $\leq 10^6$ фот/сек на входном окне аппаратуры ($\sim 5 \times 5$ мм²) и достаточно большие габаритные размеры аппаратуры, что требует вакуумного объема ~ 1 м³.

После остановки комплекса ВЭПП-2М для создания ВЭПП-2000 (конец 2000 г.), в Сибирском центре СИ отсутствует действующая экспериментальная станция, позволяющая выполнять работы в ВУФ и мягком рентгеновском диапазонах. Создаваемая на канале СИ № 10 накопителя ВЭПП-3 станция для работ в области мягкого рентгеновского излучения по своим параметрам вполне подходит для проведения калибровок "Солнечного патруля", но отсутствие свободного пространства в бункере СИ ВЭПП-3 делает невозможным размещение в нем достаточно габаритной аппаратуры патруля без удаления из бункера других действующих экспериментальных станций. В то же время станция на канале СИ № 10 хорошо подходит для абсолютных калибровок "эталонных" детекторов, которые затем могут использоваться для аттестации абсолютных потоков фотонов в других местах. То есть эта станция может являться дополняющей к какой-нибудь другой калибровочной станции, если даже абсолютный поток фотонов на этой станции точно не известен.

Поэтому для выполнения калибровок аппаратуры "Солнечного патруля" рассмотрены

варианты создания единой специализированной станции СИ для выполнения абсолютных метрологических измерений в широком диапазоне спектра 10 – 5000 эВ в зале накопителя ВЭПП-3 и на накопителе ВЭПП-4М.

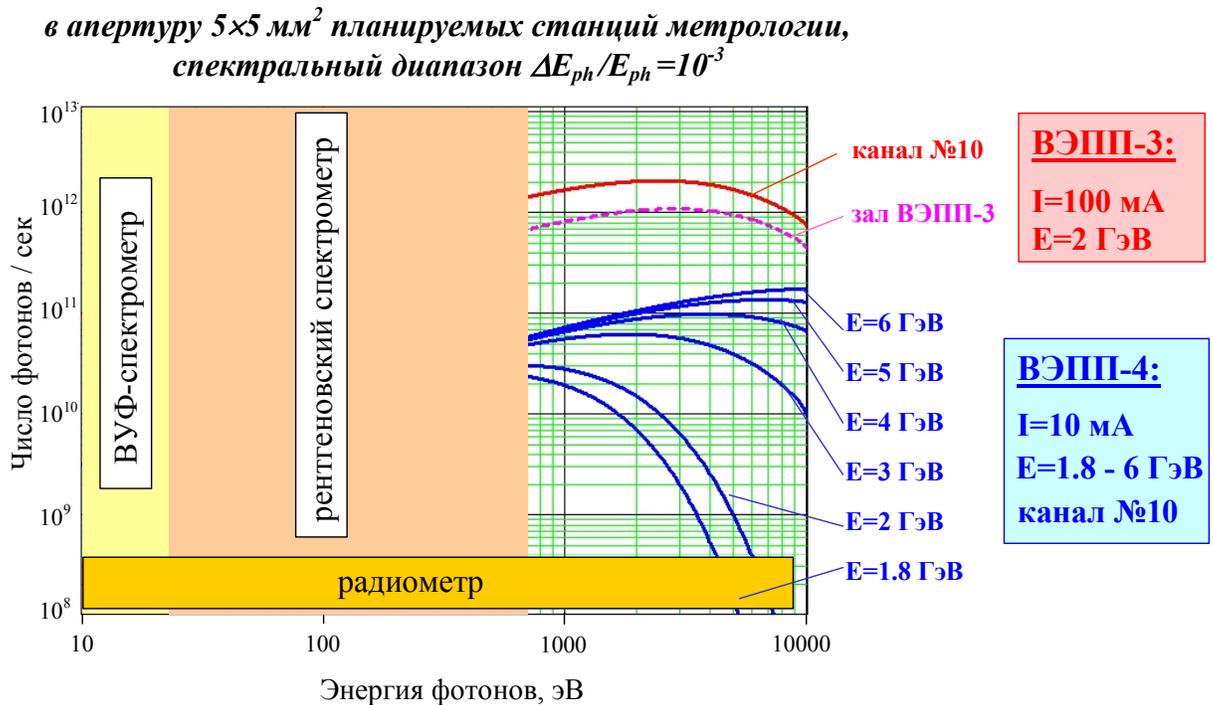


Рис.16. Условия для калибровки датчиков "Солнечного патруля" на ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

3.3. Участок для работ по рентгеновской литографии и LIGA-технологии

В 2003 году завершено строительство и отделка первой очереди лабораторной чистой комнаты, ведется подготовка работ по нанесению, травлению толстых резистов и микрогальванике.



Рис. 17. Подготовка чистой комнаты для работ по LIGA-технологии.



Рис. 18. Установка микрогальваники для работ по LIGA-технологии.

3.4. Бесфольговый канал вывода СИ на ВЭПП-3.

Основное назначение канала - метрология и EXAFS-спектроскопия в мягком рентгеновском излучении, исследования процессов газовой десорбции с внутренней поверхности вакуумной камеры под действием падающего пучка СИ.

Еще в 2001 году с целью существенного расширения диапазона используемого СИ в мягкую область (полностью белый пучок) был произведен демонтаж старого канала вывода СИ и станции рентгенолитографии (канал № 10 накопителя ВЭПП-3, имевший тонкое

бериллиевоe окно), и на их месте смонтирована часть нового бесфольгового канала СИ (от вакуумного шиберa накопителя до входа в бункер СИ ВЭПП-3) для новой станции метрологии и EXAFS-спектроскопии в мягкой рентгеновской области. Установленная часть канала была прогрета, и в ней был получен рабочий вакуум 10^{-7} Па. Была проведена трассировка пучка СИ через канал, и канал выставлен по пучку.

Собрана система быстрой аварийной защиты накопителя по вакууму в случае непредвиденной вакуумной аварии на станции (подобная система ранее апробирована на каналах СИ накопителя ВЭПП-2М и показала свою высокую эффективность). Проведен расчет вакуумной проводимости канала; показано, что в существующей геометрии мощность дифференциальной откачки позволяет иметь в экспериментальном объеме станции остаточное давление до $3 \cdot 10^{-4}$ Па. Такое давление позволяет использовать в экспериментальном объеме неметаллические уплотнения и проводить измерения на станции с использованием непрогретых объектов.

Работоспособность первой версии канала была апробирована на смонтированной экспериментальной станции фотостимулированной газовой десорбции, на которой в 2001-2002 годах был выполнен цикл экспериментов по исследованию пленочных геттерных покрытий внутренней поверхности вакуумной камеры для будущих ускорителей.

В 2003 году с учетом накопленного опыта была собрана, протестирована на вакуумном участке и установлена на ВЭПП-3 окончательная, рабочая версия канала, схема которой и общий вид показаны на рисунках 17 и 18.

По сравнению с начальным проектом изменения коснулись сегмента канала, расположенного в зале накопителя ВЭПП-3:

- Цельнометаллический шибер, отсекающий канал от накопителя, был заменен на новый, более надежный и с лучшими эксплуатационными характеристиками.
- На канале был установлен блок вертикальных и горизонтальных щелей.
- Улучшена прогревная система канала: установлен новый нагревательный кабель, обладающий существенно лучшими эксплуатационными характеристиками.

Сегмент канала, установленный в бункере СИ, на данном этапе изменениям не подвергся. Он будет заменен полностью после того, как соответствующий ему новый сегмент будет собран и пройдет вакуумные испытания на стенде.

На сегодняшний день полностью завершены конструкторские работы по проектированию этого сегмента, изготовлено 80% деталей для элементов канала, начат монтаж элементов и крепежных конструкций. Установка сегмента канала в бункере СИ планируется на июнь 2004 года.

Сразу после установки планируется начать предварительные эксперименты в рамках проекта МНТЦ №2500 по калибровке аппаратуры «Солнечного патруля». Будут проведены предварительные измерения на белом пучке СИ, исследованы фоновые условия и наводки на аппаратуру «Солнечного патруля» в условиях бункера СИ.

Для станции начата разработка монохроматора на основе рентгеновских многослойных зеркал и многослойных дифракционных решеток (диапазон 100 эВ – 5 кэВ). Первая очередь монохроматора с использованием кристаллов в качестве диспергирующих элементов поводит вести работы в спектральном диапазоне 800-5000 эВ. Расширение спектрального диапазона монохроматора в область ультрамягкого рентгена (100-800 эВ) будет достигнуто после введения второй очереди путем замены кристаллов на многослойные зеркала без изменения кинематической схемы. Завершена конструкторская разработка кинематической схемы монохроматора, подготовлены к работе и протестированы основные механизмы кинематической схемы. Изготовлен вакуумный объем монохроматора. Установка

монохроматора на пучок запланирована на осень 2004 года. Первые работы будут связаны с калибровкой элементов аппаратуры «Солнечного патруля» (пр-во ГОИ, Санкт-Петербург) в рамках проекта МНТЦ №2500.

Создание канала, станции и монохроматора поддержано «Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» («Фонд Бортника», контракты № 2024р/3955 и 1995р/3943).

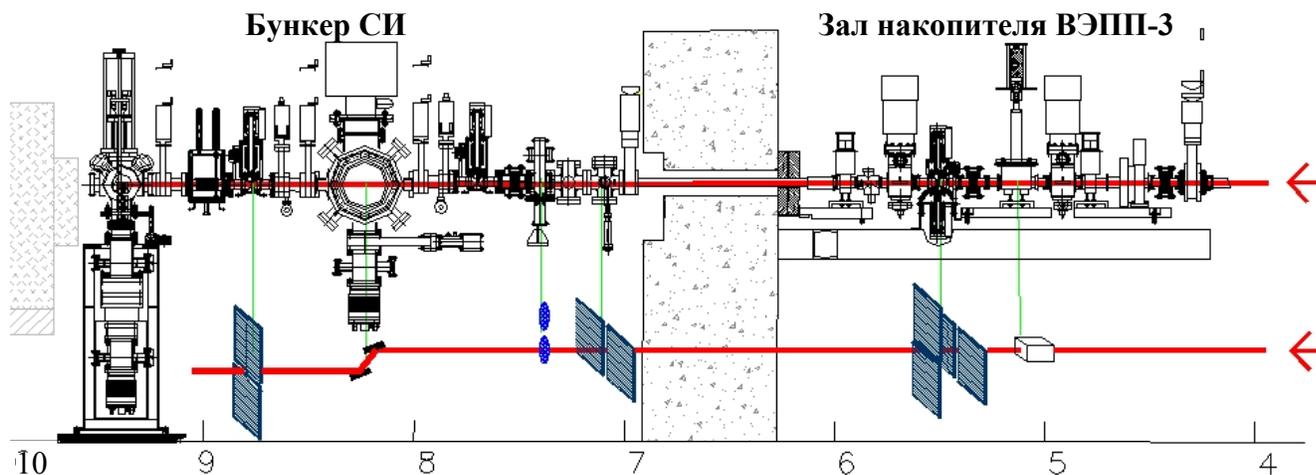


Рис. 19. Бесфольговый канал вывода СИ из ВЭПП-3 для работ с мягким рентгеновским излучением. Компонентный чертеж и оптическая схема канала. Цифры в нижней части рисунка обозначают расстояние (в метрах) до точки излучения. Сегмент канала, расположенный в зале ВЭПП-3 (4м -6м), установлен и работает; Сегмент, расположенный на территории бункера (7м-10м), находится в стадии изготовления.

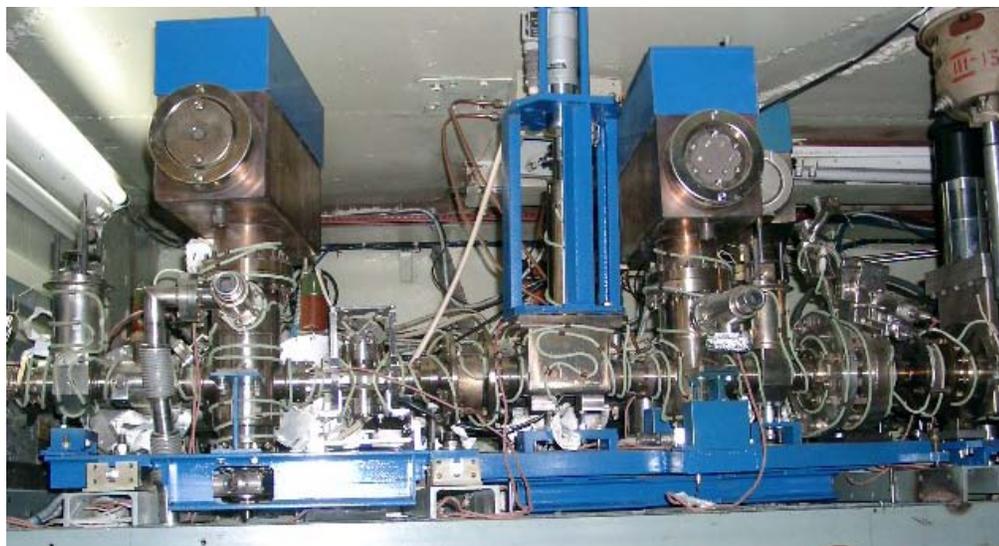


Рис. 20. Участок бесфольгового канала СИ в зале накопителя ВЭПП-3.

3.5. Цельнометаллический высоковакуумный шибер.

В ИЯФ с участием ОАО “Катод” и ЗАО “Элинда” были проведены работы по созданию и изготовлению цельнометаллических высоковакуумных шиберов (затворов) с проходным отверстием ДУ-60 и ДУ-100 с возможностями их технологического применения (т.е. многократного ежедневного срабатывания). Шибер (затвор) предназначен для отсекаания (разделения) вакуумных и газовых объемов в диапазоне давлений от 10^{-9} Па до $2 \cdot 10^5$ Па и допускает нагрев его для обезгаживающего отжига: а) в закрытом состоянии, вакуум – атмосфера до 180°C ; б) в закрытом состоянии, вакуум – вакуум до 280°C ; г) в открытом состоянии, вакуум – вакуум до 350°C . Изготовлено более 40 шиберов, и все они установлены на экспериментальных установках ИЯФ, а также на технологической линии производства фотоэлектронных приборов. Управление шибера как ручное, так и с электрическим приводом, вес ДУ-100 с ручным приводом не более 12 кг.



Рис. 21. Высоковакуумный шибер ДУ-100.

3.6. Двухкристальный монохроматор с фиксированным выходом.

Разработан, изготовлен и тестирован новый двухкристальный монохроматор с фиксированным положением пучка на выходе для дифрактометрии на каналах вывода СИ 2 и 6 из ВЭПП-3. Вынос пучка равен $h=40$ мм, и диапазон энергии для кристаллов Si-(111) составляет 5–19 кэВ. Главная цель, достигаемая в данной конструкции монохроматора, состоит в том, что наиболее ответственные поверхности элементов кинематики являются “простыми” – плоскостью или поверхностью цилиндра, что позволяет достичь высокой точности при изготовлении. Точная подстройка второго кристалла производится механизмом, использующим напряженную волновую передачу с высоким коэффициентом передачи, который изменяет угол поворота кристалла с шагом $\sim 0.3^{\circ}$.



Рис. 22. Двухкристальный монохроматор с фиксированным положением пучка на выходе.

3.7. Новые детекторы для системы непрерывного радиационного контроля.

В 2003 году изготовлен действующий прототип ионизационной камеры для системы непрерывного радиационного контроля второго ИЯФовского поколения, на котором исследованы физические параметры этого детектора и пригодность разработанной оригинальной технологии его изготовления. Изготовлены первые 400 датчиков (шариков), изображенных на снимке. Предполагается их заполнение аргоном (диапазон 3 – 30 КэВ) и ксеноном до 100 КэВ. Предполагается широкое использование новых детекторов как на станциях СИ (вместо ранее установленных), так и на других установках (ВЭПП-2000, Центр фотохимии и т.д.). После всесторонней аттестации датчики планируются к поставке на “Сибирь1-2” и ТНК.



Рис.23. Новый детектор для системы непрерывного радиационного мониторинга.

4. Создание новых накопителей – источников СИ и магнитных систем для генерации СИ.

4.1 Специализированный накопитель – источник СИ «Сибирь–2».

Курчатовский источник синхротронного излучения (КИСИ, г. Москва) - специализированный ускорительный комплекс, предназначенный для генерации пучков синхротронного излучения (СИ). Он был полностью разработан, изготовлен в ИЯФ СО РАН (руководитель проекта В.Н.Корчуганов) и размещен на территории РНЦ “Курчатовский институт”. Комплекс включает в себя два накопителя электронов: Сибирь–1 на 450 МэВ и Сибирь–2 на 2.5 ГэВ. Первый пучок на энергии 450 МэВ был инжектирован в Сибирь–2 в 1995 г.

В результате проведенных в 2003 году работ на комплексе «Сибирь» выработан и стабильно воспроизводится режим работы, приемлемый для проведения экспериментов с синхротронным излучением – накопленный ток в “Сибири–2” до 230 мА, ускоренный – 150 мА (2.5 ГэВ) при времени жизни 3-5 час для тока 100 мА.

4.2. Технологический накопительный комплекс (ТНК).

Накопитель-источник СИ для российского научно-производственного центра микроэлектроники (г. Зеленоград) был спроектирован и изготовлен в ИЯФ в период 1990 – 1996 г.г. Его основное назначение – производство изделий микромеханики методами рентгеновской литографии и LIGA-технологии. Проектная энергия ТНК – 1.6 ГэВ, возможно ее увеличение в будущем до 2.5 ГэВ путем установки второго ускоряющего резонатора и увеличения мощности ВЧ-системы. В период 1997-2001 годы финансирование проекта было приостановлено. В 2002 году начата поэтапная сборка и запуск всех систем ТНК. Был собран и запущен форинжектор, получен ток 30 мА при энергии 55 МэВ. В 2003 году собраны канал перепуска в малый накопитель (бустер) и магнито-вакуумная система бустера. В 2004 и последующие годы работы по сборке и запуску накопителя ТНК в Зеленограде будут продолжены.



Рис.24. Технологический накопительный комплекс, Зеленоград (2003).

4.3. Проект SAGA.

В 2002 г. в Японии было принято решение о создании источника СИ на юге страны в префектуре Сага (остров Кюсю). Основные параметры источника СИ:

- Энергия (инжекции/номинальная): 0.35 ГэВ/1.4 ГэВ.
- Ток: > 300 мА.
- Минимальный эмиттанс: 15 нм-рад.
- Периметр: 75.6 м.
- Время жизни: > 5 час при токе 300 мА.

Планируется оснастить источник одним или двумя сверхпроводящими вигглерами с полем 5-7 Т и четырьмя-пятью ондуляторами.

Основные направления экспериментальной деятельности включают в себя:

- В области мягкого рентгена: LIGA, фотохимия, XPS, UPS.
- В области жесткого рентгена: XAFS, рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеновская дифрактометрия.

В 2002 г. ИЯФ спроектировал, изготовил и поставил в Японию прототип дипольного магнита для накопителя SAGA и в начале 2003 года выиграл тендер на изготовление элементов магнитной системы этого источника СИ, включающей 16 дипольных магнитов, 40 квадрупольных линз и 32 секступольные линзы. Несмотря на очень жесткие сроки выполнения, в том же 2003 году все магниты были поставлены заказчику.



Рис. 25. Магниты для SAGA.

4.4. Сверхпроводящие вигглеры.

В 2003 году были продолжены контрактные работы по созданию сверхпроводящих вигглеров для зарубежных накопителей – источников СИ. В частности, был запущен 49-полюсный вигглер с периодом 6 см и магнитным полем 3.5 Т на накопителе ELETTRA (Триест, Италия).

Таблица 2. Параметры вивглера для накопителя ELETTRA.

Назначение	Год запуска	Макс поле, Т	Число полюсов (основн. + корр.)	Зазор, мм	Длина полюса мм	Полная магн. длина, мм	Верт. апертура, мм	Мощность СИ, кВт	Энергия ГэВ	Ток пучка e^- , А
ELETTRA (Italy)	2003	3.5	45+4	18	30	1680	11	6	2	0.1

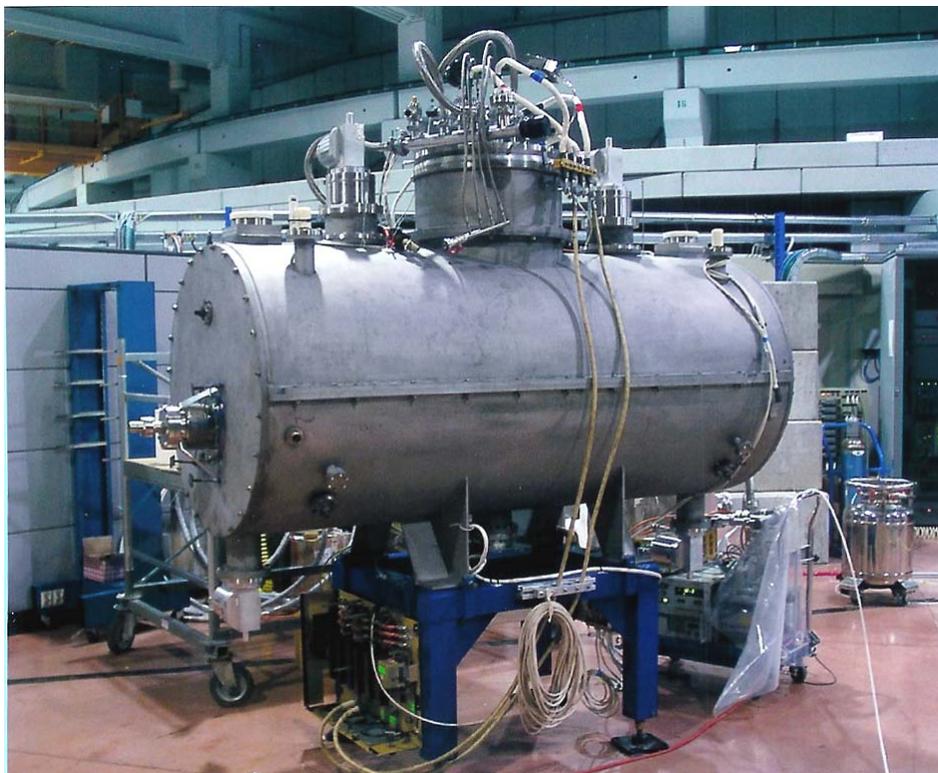


Рис. 26. 49-полюсный вивглер для накопителя – источника СИ ELETTRA.

4.5. Superbend.

В 2002-2003 годах в ИЯФ был разработан и изготовлен, а в конце 2003 года успешно испытан на стенде новый вид сильнополевого сверхпроводящего генератора СИ - superbend for BESSY-II (поворот на 11.25°), - поворотный магнит с магнитным полем до 9.35 Т (вертикальная апертура по полюсам магнита – 46 мм). На базе таких магнитов в ближайшем будущем возможно создание компактных и дешевых накопителей – SR sources для университетов, а также для промышленных компаний.



Рис. 27. Superbend для BESSY-II (Germany).

5. Лазеры на свободных электронах.

5.1. Создание Сибирского центра фотохимических исследований на основе мощного лазера на свободных электронах.

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) позволяют получать монохроматическое излучение на любой заданной длине волны. В настоящее время в мире ведутся интенсивные работы по созданию мощных (> 1 кВт средней мощности) ЛСЭ. Проблему составляет также относительно широкая линия генерации (обычно более 0.1%). Для создания промышленных фотохимических технологий требуется достичь уровня средней мощности ~ 10 кВт и монохроматичности не хуже нескольких сотых процента.

В настоящее время в ИЯФ ведется строительство мощного ЛСЭ. В основе своей полномасштабный мощный лазер на свободных электронах будет иметь многорожечный ускоритель-рекуператор с максимальной энергией 50 МэВ. Ожидаемый диапазон длин волн излучения полномасштабного ЛСЭ от 3 до 300 микрон.

5.2. Первая очередь ЛСЭ для центра фотохимии - субмиллиметровый лазер на свободных электронах со средней мощностью до 7 кВт.

Ускоритель первой очереди ЛСЭ включает в себя полную ВЧ систему (все резонаторы и генераторы) и также инжектор вместе с впускным каналом, но, в отличие от полномасштабного варианта, имеет только одну орбиту. Эта машина запущена в действие в апреле 2003 г. На Рис. показана схема ускорителя-рекуператора первой очереди.

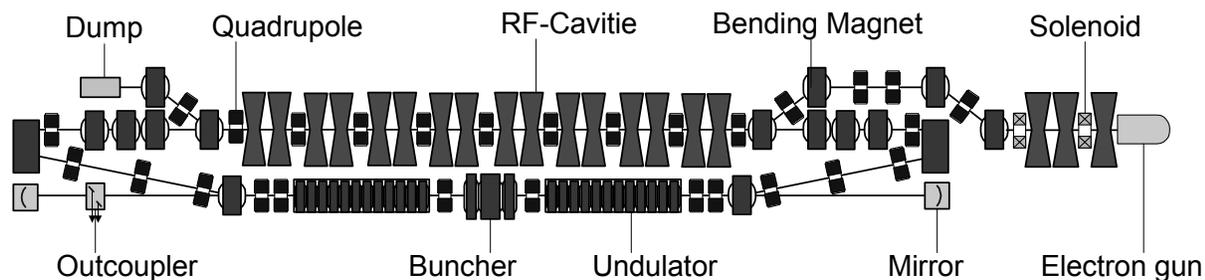


Рис. 28. Схема первой очереди Новосибирского мощного лазера на свободных электронах.

Пучок электронов из инжектора с энергией 2 МэВ в основной ускоряющей структуре набирает энергию 12 МэВ и попадает в ондуляторе, где отдает часть своей энергии в излучения. После этого пучок, возвращаясь в основную ускоряющую структуру в замедляющей фазе, теряет энергию практически до энергии инжекции и сбрасывается в поглотитель. Основные параметры ускорителя-рекуператора представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры ускорителя (первой очереди).

Длина волны ВЧ, м	1.66
Количество ВЧ резонаторов	16
Амплитуда ускоряющего напряжения на одном резонаторе, МВ	0.7
Энергия инжекции, МэВ	2
Максимальная энергия электронов, МэВ	12
Частота следования сгустков, МГц	1.4 – 22.5
Средний ток, мА	2 – 40
Эмитанс пучка, мм•мрад	1
Энергетический разброс в ЛСЭ, %	1
Длина электронного сгуска в ЛСЭ, нс	0.02 – 0.1
Пиковый ток в ЛСЭ, А	40 – 10



Рис. 29. 4 апреля 2003 г. на первой очереди Новосибирского мощного лазера на свободных электронах была получена генерация в области длин волн ~ 100 мкм.

В магнитной системе ЛСЭ использованы два одинаковых ондулятора, включенные последовательно, и магнит-трехполюсник для подстройки фазы. Стабильный режим работы ЛСЭ достигается при среднем токе не менее 5 мА, что соответствует частоте следования электронных сгустков 5.6 МГц. Такой режим работы ЛСЭ соответствует одному световому сгустку в оптическом резонаторе, взаимодействующему с каждым электронным сгустком. Основная часть измерений параметров излучения ЛСЭ производилась с выведенными скреперами (устройствами, отвещающими часть мощности из оптического резонатора в калориметры), по выходящему излучению через отверстие в одном из зеркал резонатора. Вместо того, что бы изменять длину оптического резонатора (механической подвижкой зеркал) мы плавно меняли частоты основного задающего ВЧ-генератора, следовательно, регулировали расстояние между сгустками.

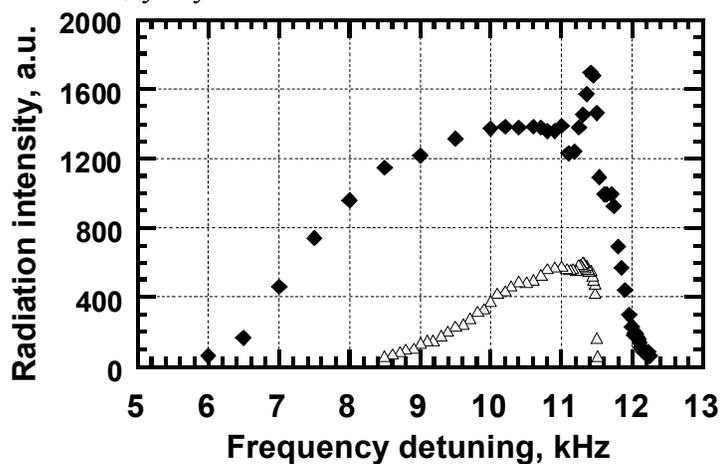


Рис. 30. Зависимость мощности излучения ЛСЭ от отстройки частоты основного ВЧ $f = 180\ 400$ Гц (ромбы для частоты следования электронных сгустков 5.6 МГц, треугольники для частоты следования электронных сгустков 2.8 МГц).

Для нахождения длины волны и ширины спектра излучения мы использовали вращающийся интерферометр Фабри-Перо. Типичная интерференционная картина показана на Рис.27. Меняя магнитное поле в ондуляторах, была получена устойчивая генерация в диапазоне 120-180 мкм. Относительная ширина спектра около $3 \cdot 10^{-3}$. Соответствующая величина длины когерентности $\lambda^2/2\Delta\lambda = 2$ см, очень близка к длине электронного сгустка.

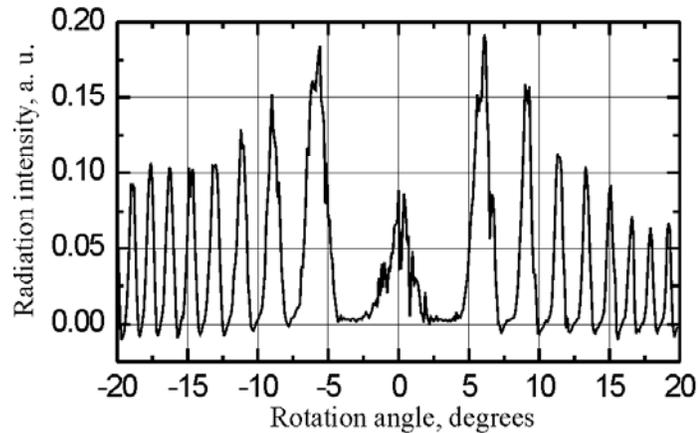


Рис. 31. Зависимость мощности излучения ЛСЭ от угла поворота интерферометра Фабри-Перо (длина волны $\lambda=136$ мкм).

Измерения потерь в оптическом резонаторе производились при помощи быстрого детектора на основе диода Шоттки. На рисунке можно видеть последовательность световых сгустков следующих с частотой 5.6 МГц. Выключая электронную пушку, мы измеряли добротность оптического резонатора по темпу снижения выходящей мощности. Типичные значения потерь 5-8%.

Достаточно высокий коэффициент усиления малого сигнала и малые потери в оптическом резонаторе позволили получить устойчивую генерацию не только на частоте $f_0 = 5.6$ МГц, но и на некоторых более низких частотах $f_0/2$, $f_0/3$, $f_0/4$ и $2 \cdot f_0/3$. На рисунке показана временная зависимость выходящей мощности при частоте $f_0/4$, по которой так же можно вычислить потери за один пролет в оптическом резонаторе. Глядя на эту зависимость можно заключить, что максимальный достигнутый коэффициент усиления малого сигнала составлял около 30%.

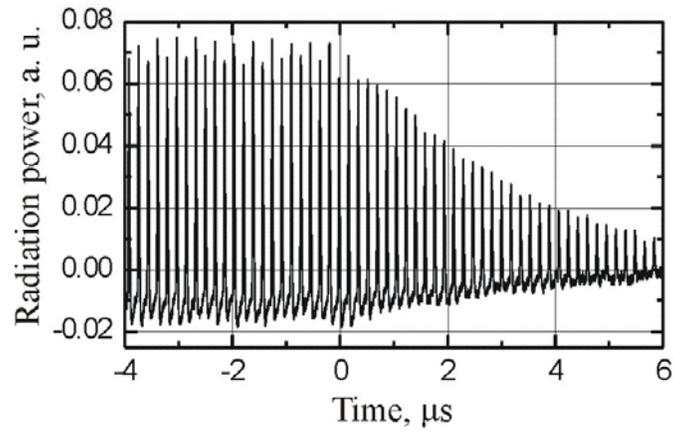


Рис. 32. Временная зависимость мощности выходящего излучения после отключения электронного пучка.

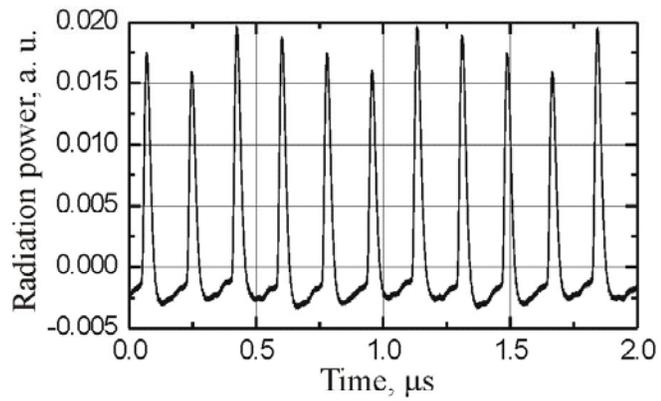


Рис. 33. Временная зависимость мощности выходящего излучения при частоте следования сгустков 1.4 МГц (что соответствует одной четвертой частоты обращения светового сгустка в оптическом резонаторе).

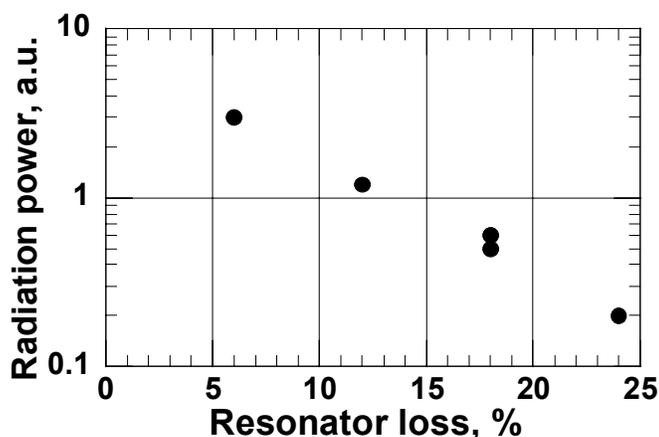


Рис. 34. Средняя мощность, запасенная в оптическом резонаторе в зависимости от потерь на один цикл усиления.

Для измерения абсолютной величины выводимой мощности излучения мы использовали два способа. Первым способом мы измеряли мощность излучения, выходящего через отверстие в зеркале резонатора, без введения скреперов. В этом случае была получена величина около 10 Вт, что соответствует 2 кВт запасенной мощности внутри резонатора. Другой способ состоял в одновременном введении двух скреперов справа и слева до уменьшения внутрирезонаторной мощности в два раза. Измеренная мощность на каждом калориметре получилась 20 Вт. Учитывая потери мощности в резонаторе, получим полные потери в резонаторе 100 Вт. Для поддержания генерации эти потери должны компенсироваться электронным пучком, средняя мощность которого составляет 50 кВт. Соответственно эффективность передача энергии от электронного сгустка к световому сгустку 0.2%. Причина столь малой эффективности, вероятно, связана с достаточно большим энергетическим разбросом в электронном сгустке, а также, возможно, и с большой длиной ондулятора. В ближайших планах получить генерацию, отключив один из ондуляторов. Для уменьшения энергетического разброса находится в рассмотрении возможность установки дополнительного резонатора, работающего на третьей гармонике основного ВЧ.

5.3. Полномасштабный ЛСЭ для центра фотохимии – разработка проекта.

В 2003 году продолжалась работа по разработке полномасштабного ускорителя-рекуператора (4 дорожки). Методом численного моделирования проведено исследование продольного и поперечного движения электронного пучка в полномасштабном УР. Уточнено количество, положение и сила магнитов УР. Подготовлены проекты магнитной и вакуумной систем полномасштабного ускорителя-рекуператора.

Полномасштабный УР использует ту же ускоряющую ВЧ-структуру, что и УР первой очереди, но расположен, в отличие от последнего, в горизонтальной плоскости. Таким образом, не требуется демонтаж одной для постройки другой. Выбор машин осуществляется простым переключением поворотных магнитов. Полномасштабный УР построен по схеме разрезного микротрона, причем рекуперация энергии электронного пучка происходит по той же схеме, что и ускорение, но фазы пролета ускоряющей структуры отображаются зеркально. Основные проектные параметры полномасштабного УР следующие:

Энергия инжекции полная, MeV	2;
Максимальная энергия пучка, MeV	50;
Максимальная частота повторения, MHz	90;
Максимальный средний ток пучка, mA	150.

В дальнейшем планируется установить на последнюю (50 MeV) дорожку УР мощный ЛСЭ ближнего ИК диапазона в области длин волн 3 - 12 μm .

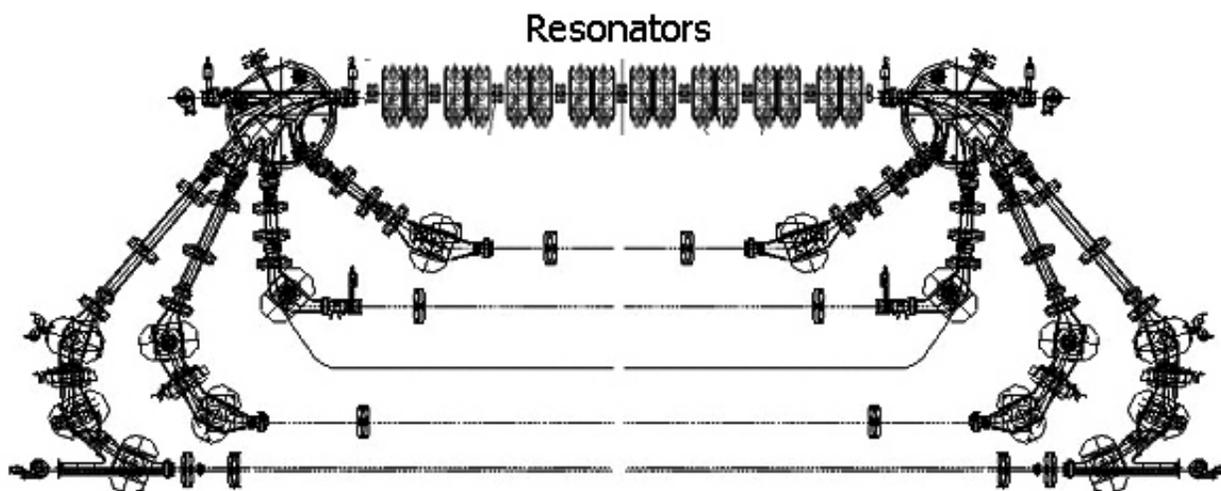


Рис. 35. Общий вид поворотов ускорителя-рекуператора второй очереди.

5.4. Основные результаты за 2003 год:

- Получена генерация на ЛСЭ первой очереди в диапазоне длин волн 100-200 μm .
- Измерены параметры излучения.
- Изготовлена и монтируется система вывода излучения.
- Сконструирована и изготавливается станция диагностики излучения.
- Изучаются возможности повышения среднего тока пучка.
- Достигнута предельная эффективность рекуперации мощности электронного пучка.
- Спроектирована магнито-вакуумная система полномасштабного УР.
- Проведены семь заседаний межинститутского междисциплинарного семинара "Терагерцовое излучение и его применение" с целью формирования программы использования ЛСЭ.
- Продолжено оснащение экспериментальных станций Центра. Уже работают ИК Фурье-спектрометр (Брукер), газовый хроматограф, аэрозольный спектрометр, установка лазера-индуцируемой флуоресценции (ЛИФ), закуплен хроматомасс-спектрометр (Хьюллет-Паккард).
- Продолжены исследования инфракрасной многофотонной диссоциации кремнийсодержащих молекул с целью поиска оптимальной системы для разделения изотопов кремния. Проведены расчеты изотопических сдвигов частот колебаний SiH_2F_2 и SiH_2Cl_2 .

- Начаты работы по изучению лазерной абляции твердых поверхностей под действием коротких лазерных импульсов. Создана диагностическая установка на базе хроматографа (для изучения газового состава) и аэрозольного спектрометра (для определения размеров твердых частиц). Получены первые результаты по лазерной абляции полиметилметакрилата.

5.5. Участие ИЯФ в зарубежных проектах ЛСЭ.

Компактный, недорогой лазер на свободных электронах дальнего инфракрасного (терагерцового) диапазона с перестраиваемой длиной волны (~100-360 $\mu\text{м}$ или 3 - 0.85 ТГц) был разработан и успешно запущен Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, в сотрудничестве с Исследовательским институтом атомной энергии, Республика Корея. ЛСЭ создан на базе классического микротрона-инжектора с варьруемой энергией ускоренных электронов, что обеспечивает, совместно с изменением поля в ондуляторе весь диапазон перестройки.

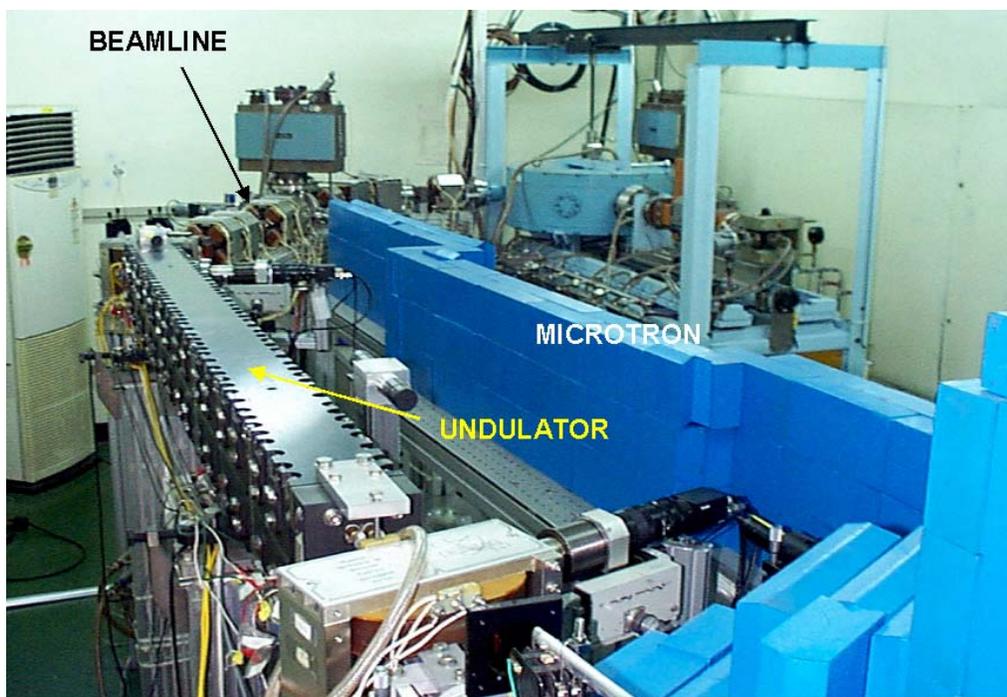


Рис. 36. ЛСЭ на базе микротрона-инжектора с варьруемой энергией ускоренных электронов в KAERI.

ИК излучение генерируется в оптическом резонаторе (конфокальном в горизонтальной и волноводном в вертикальной плоскостях) длиной ≈ 2780 мм с цилиндрическими зеркалами на торцах, выводится через отверстие связи в одном из зеркал и по вакуумному каналу длиной ≈ 10 м квазипараллельным пучком транспортируется к стенду пользователей ИК света. Мощность ИК излучения, выпущенного из резонатора и на стенде в макро импульсе длительностью 2-4 мкс составляет ≈ 30 -50 Вт и 10-12 Вт соответственно. На стенде пучок излучения имеет цилиндрическую симметрию с шириной по полувысоте ≈ 7 мм и 10 мм для длин волн 100 $\mu\text{м}$ и 200 $\mu\text{м}$ соответственно. Спектральная ширина излучения ЛСЭ составляет 0.5-1.0%. Дрейф энергии излучения в макроимпульсе не превосходит 10% при

длительной работе ЛСЭ.

В настоящее время на базе данного ЛСЭ развертываются исследования в инфракрасной микроскопии, молекулярной спектроскопии, физике твердого тела и других областях. В 2003 г. был разработан и установлен стенд для пользователей, снабженный детекторами для измерения параметров ИК пучка (энергия, мощность, длительность импульса, длина волны, поляризация ИК излучения и т.д.) и системами, предназначенными для сканирования ИК пучком исследуемых объектов. В конце 2003 г. на ИК ЛСЭ были проведены первые измерения, продемонстрировавшие его возможности для использования в спектроскопии газов, получении изображений в терагерцовом диапазоне и для исследований в физике твердого тела.

ИЯФ участвует в реализации проекта мощного IR FEL на базе сверхпроводящего линака в том же KAERI, Корея. В 2003 году, ВЧ-система новой машины была запущена в действие. Она состоит из двух криомодулей с 352-МГц сверхпроводящими резонаторами из CERN в общем криостате, и двух 50-кВт 352-МГц генераторных модулей, изготовленных в ИЯФ. Полное RF напряжение 10 МВ уже получено на резонаторах. Также изготовлен, собран и проверен канал от инжектора к резонаторам. Мощный 10-МэВ SC linac, как промежуточная стадия, был испытан. Полномасштабный проект включает второй SC-модуль, замыкающую орбиту, и FEL, установленный на ней. Схемой ускорителя является “energy-recovery linac”. Необходимо увеличить максимальное ВЧ-напряжение до 20 МэВ на каждом модуле. В этом случае можно ожидать получение около 10 кВт и более CW FEL излучения в области 6 – 20 микрон.

В настоящее время ИЯФ также принимает участие в разработке и создании нового синхротрона-инжектора с энергией 1.2 GeV для ЛСЭ на базе накопителя электронов в Duke University (USA).

6. Кто и каким образом проводит работы в Сибирском центре СИ ?

Работы, проводимые в Сибирском центре СИ, носят коллективный характер и перекрывают широкий спектр научных и технологических задач. В настоящее время в работах участвуют 54 российских и 34 зарубежных организаций.

6.1. Постоянный коллектив.

Основой научно-технического коллектива Центра являются сотрудники Лаборатории синхротронного излучения и ряда других лабораторий Института ядерной физики вместе с постоянно работающими в Центре СИ сотрудниками из нескольких других институтов СО РАН (Институт химии твердого тела и механохимии, Институт гидродинамики, Институт химической кинетики и горения, Институт катализа). Именно этот персонал численностью около 120 человек обеспечивает работу по основным проектам Центра, включая внешние контракты, и функционирование экспериментальных станций.

6.2. Научно-исследовательские группы из других организаций.

Значительно больший круг исследователей проводят свои эксперименты на станциях Центра СИ лично или с помощью своих партнеров по грантам, контрактам, соглашениям о научно-техническом сотрудничестве. Такие работы проводятся периодически, в пределах выделяемого на них времени, до шести 12-часовых смен в неделю для сотрудников СО РАН

или заездами длительностью от одной до нескольких недель для иногородних. Одной из форм сотрудничества является исследование различных объектов и образцов, передаваемых другими организациями «хозяевам» экспериментальных станций, при проведении совместных работ.

Еще одной составляющей загрузки экспериментальных станций Центра СИ является практика студентов и стажировка аспирантов и научных сотрудников.

6.3. Научное сотрудничество Сибирского центра СИ.

Новосибирские институты СО РАН:

1. Институт ядерной физики,
2. Институт химии твёрдого тела и механохимии,
3. Институт катализа,
4. Институт неорганической химии,
5. Институт физики полупроводников,
6. Институт автоматики и электрометрии,
7. Объединенный институт геологии и геофизики,
8. Институт лазерной физики,
9. Институт гидродинамики,
10. Институт химической кинетики и горения,
11. Институт теоретической и прикладной механики,
12. Конструкторско-технологический институт монокристаллов,
13. Институт археологии и этнографии,
14. Институт цитологии и генетики.

Институты других научных центров СО РАН:

1. Лимнологический институт СО РАН,
2. Институт оптики атмосферы, Томск;
3. Институт физики прочности и проблем материаловедения, Томск,
4. Институт физики СО РАН, Красноярск,
5. Институт химической технологии, Красноярск,
6. Институт леса, Красноярск.

Институты РАН:

1. Институт кристаллографии, Москва,
2. Физический институт им. П.Н.Лебедева, Москва,
3. Институт нефтехимического синтеза РАН, Москва,
4. Институт общей и неорганической химии, Москва,
5. Институт высоких температур, Москва, 6. Институт теоретической и экспериментальной биофизики, Пущино,
7. Институт металлургии, Екатеринбург,
8. Институт физики металлов, Екатеринбург,
9. Физико-технический институт Уральского отделения РАН, Ижевск,
10. Институт неорганических и элементо-органических соединений, Москва, 11. Институт структурной макрокинетики, Черноголовка,
12. Санкт-Петербургский институт ядерной физики,
13. Институт химической физики РАН,
14. Институт океанографии ДВО РАН.

Университеты и ВУЗы России:

1. Московский государственный университет,
2. Московский инженерно-физический институт,
3. Технический университет им. Баумана,
4. Новосибирский государственный университет,
5. Новосибирский государственный технический университет,
6. Институт физики и механики при Саратовском государственном университете,
7. Томский политехнический университет,
8. НИИЯФ при Томском политехническом университете,
9. Челябинский государственный университет,
10. Томский политехнический университет,
11. Иркутский государственный университет,
12. Кемеровский университет.

Отраслевые научно-исследовательские институты России:

1. РНЦ “Курчатовский институт”, Москва,
2. Государственный оптический институт, Санкт-Петербург,
3. ФГУП НИИФП им. Ф.В. Лукина, Зеленоград,
4. Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики, Снежинск,
5. Всероссийский институт экспериментальной физики, Саров (Арзамас-16), Нижегородская обл.,
6. Государственное научно-производственное предприятие «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», Томск,
7. Институт нефтехимического синтеза им. Топчиева,
8. Институт химической физики им. Карпова.

Список зарубежных научных учреждений и исследовательских центров промышленных компаний, с которыми Сибирский центр синхротронного излучения проводил совместные работы в 2002-2003 годах.

1. Лаборатория Дарсбери, Отделение синхротронного излучения (Synchrotron Radiation Depart., CLRC Daresbury Laboratory), Дарсбери, Англия.
2. Источник СИ “Diamond”, Оксфорд, Англия.
3. Центр инновации в катализе, Ливерпуль, Англия.
4. Европейский институт электронной микроскопии, Антверпен, Бельгия.
5. Институт минералогии и петрологии Университета Бонна (Mineralogisch Petrologisches Institut, Universitet Bonn), Германия.
6. Центр синхротронного излучения BESSY-II, Берлин, Германия.
7. Центр синхротронного излучения ANKA, Карлсруэ, Германия.
8. Технический университет, Мюнхен, Германия.
9. Фриц-Хабер Институт, Берлин, Германия,
10. Франкфуртский институт материаловедения и радиационной техники (Fraunhofer Institut für Werkstoff-und Strahltechnik), Дрезден, Германия.
11. Институт химической технологии, Патрас, Греция.
12. Ганн-Майтнер институт, Берлин, Германия.
13. Центр передовых технологий (CAT), Indor, Индия.
14. Центр ядерных исследований, Момбей, Индия,
15. Университет Севильи (Испания).
16. Центр синхротронного излучения ELETTRA (Триест, Италия).

17. Исследовательский институт атомной энергии (KAERI), Республика Корея.
18. Аргонская национальная лаборатория, США.
19. Исследовательский центр SLAC, Стенфорд, США.
20. Университет Дюк, США.
21. Исследовательский центр фирмы “Istmen Kodak”, США.
22. Лаборатория Кристаллографии (Laboratoire de Cristallographie, CNRS, Grenoble), Гренобль, Франция.
23. Европейский центр синхротронного излучения (European Synchrotron Radiation Facility, ESRF), Гренобль, Франция.
24. LURE - Центр синхротронного излучения CNRS, Орсэ, Франция.
25. Soleil - Центр синхротронного излучения, Орсэ, Франция.
26. Парижская лаборатория минералогии и кристаллографии Парижского университета (Laboratoire de Mineralogie et de Cristallographie de Paris, Universite Paris), Франция.
27. CERN, Швейцария.
28. Институт им. Пауля Шерера (Paul Scherer Institute), гор. Виллиген, Швейцария.
29. Центр синхротронного излучения SPring-8 и Японский исследовательский институт синхротронного излучения (JASRI), Харима, Япония.
30. Центр синхротронного излучения Saga University, Япония.
31. Центр синхротронного излучения Photon Factory, Цукуба, Япония.
32. Институт новейших технологий (Япония).
33. Kawasaki Heavy Industries, Япония.
34. Harima Works, Япония.