

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



**ОТЧЁТ СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА 2002 ГОД.**

НОВОСИБИРСК - 2003

В настоящем отчете в краткой форме изложены основные направления и результаты деятельности Сибирского центра синхротронного излучения в 2002 году. Описаны существующие и разрабатываемые экспериментальные станции на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3, обсуждаются результаты исследований, проведенных на этих станциях в 2002 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. В конце отчета помещен список публикаций с участием сотрудников Сибирского центра СИ, вышедших в 2002 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, организованный на базе лабораторий Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, как и в прежние годы, является основным местом проведения исследований с синхротронным излучением (СИ) и лазерами на свободных электронах (ЛСЭ) в России. Программа работ Сибирского центра синхротронного излучения в 2002 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 2002 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 грантов: Интеграционные проекты СО РАН, гранты РФФИ;
- г) доходов от работ, выполненных по договорам с организациями России;
- д) доходов от работ, выполненных по контрактам с организациями зарубежных стран (основной источник доходов);
- е) международного сотрудничества.

1. Работа на накопителях ИЯФ СО РАН.

В 2002 г. работы на пучках СИ были сосредоточены на накопителе ВЭПП-3. На эксперименты с синхротронным излучением на ВЭПП-3 было выделено 2636 часов из 4848 часов общего 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 2002 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 2002 г.

Канал СИ	Станция
0	LIGA–технология–2 (новая станция на канале 11-полусного вигглера, работает).
0	“Взрыв - 1” - изучение процессов детонации и свойств вещества при прохождении детонационного фронта на пучке СИ из разрабатываемого 5 Т вигглера (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).
5с	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	Рентгеновская литография и исследования десорбции под пучком СИ (установлен бесфольговый канал вывода СИ, станция запускается, проведены первые эксперименты).

Основные успехи в 2002 году были получены на ряде приоритетных направлений: эксперименты на новой станции для исследования процессов детонации и поведения вещества при прохождении детонационного фронта, реконструкция сигналов о состоянии среды в прошлом (станция “Байкал”), создание новой станции глубокой рентгеновской литографии и LIGA-технологии, проведение ряда “in situ” исследований новых технологических процессов.

2. Основные результаты исследований на пучках синхротронного излучения, разработка новых методов и аппаратуры.

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

На канале СИ «0» из ВЭПП-3 смонтирована и запущена в эксплуатацию новая экспериментальная станция специально для исследования детонационных и взрывных процессов (Рис. 1.). Предварительные эксперименты на станции показали возможности разрабатываемой установки: временное разрешение для измерения плотности порядка 20 нс, точность измерения плотности порядка 5 %, временное разрешение для измерения малоуглового рассеяния и дифракции – 125 нс при экспозиции 1 нс. Ожидаемое

пространственное разрешение для измерения плотности 0.1x1 мм. На станции выполнена серия экспериментов по исследованию детонации в различных ВВ, а также по исследованию воздействия ударных волн на различные вещества.

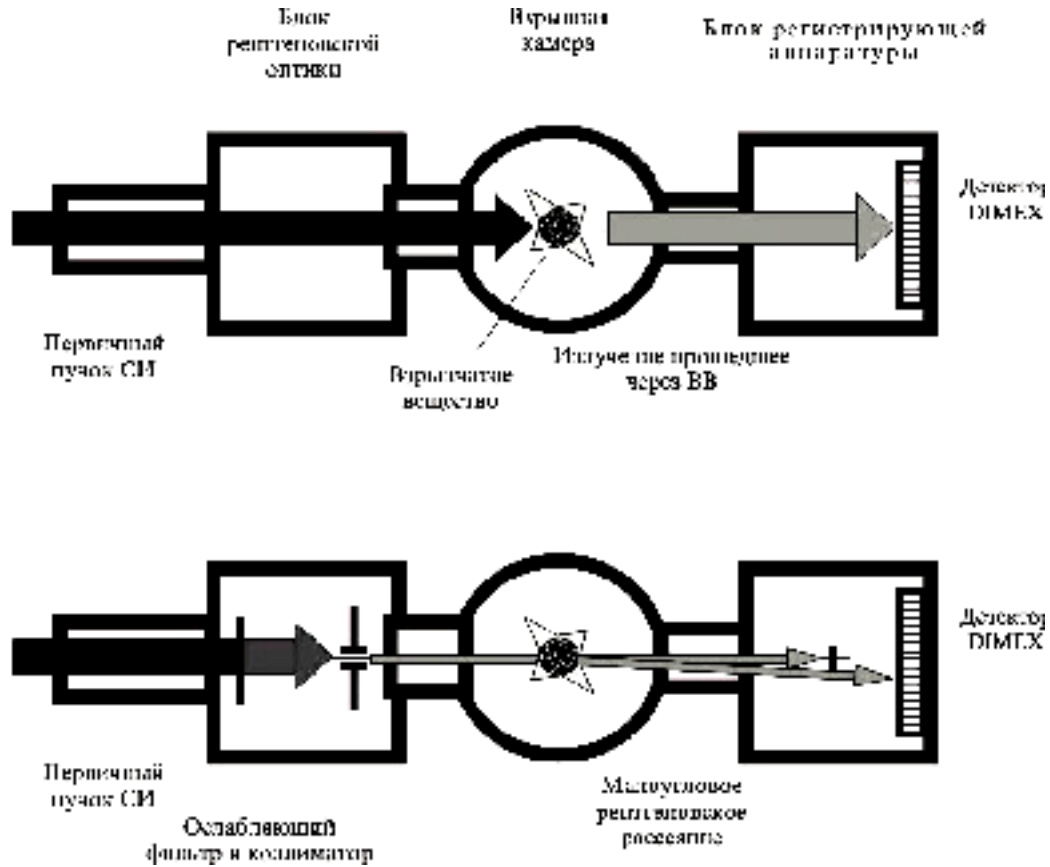


Рис. 1. Схема постановки взрывного эксперимента на канале СИ из ВЭПП-3:
 а) абсорбционный эксперимент; б) малоугловое рентгеновское рассеяние.

В настоящее время на станции разрабатывается пять методических направлений:

1. измерение распределения плотности (рентгеновская микротомография);
2. исследование динамики флуктуации электронной плотности (малоугловое рентгеновское рассеяние);
3. изменение атомной структуры вещества (рентгеновская дифрактометрия с высоким временным разрешением «дифракционное кино»);
4. исследование динамики изменения электронной структуры атомов (рентгеновская спектроскопия)
5. рентгеновская томография с наносекундным временным разрешением.

Перспективы развития станции связаны с дальнейшим развитием источников СИ – накопителей электронов с установленными на них вигглерами и ондуляторами. Планируемая установка на ВЭПП-3 вигглера с полем 5Т увеличит поток фотонов в

диапазоне 30-40 кэВ на порядок. Переход на накопитель ВЭПП-4 и установка 21-полюсного вигглера увеличат поток ещё на порядок. А использование сверхпроводящего 101-полюсного вигглера с полем 7 Т позволят получать потоки порядка 10^{12} фотон/мм² за время порядка одной наносекунды. Такие огромные потоки дают возможность реализовать оригинальные рентгенооптические схемы, которые позволят получить пикосекундное и даже фемтосекундное временное разрешение.

Второй 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 (Рис. 2). Обработка таких данных позволяет восстановить 3-х мерное распределение плотности за детонационным фронтом.

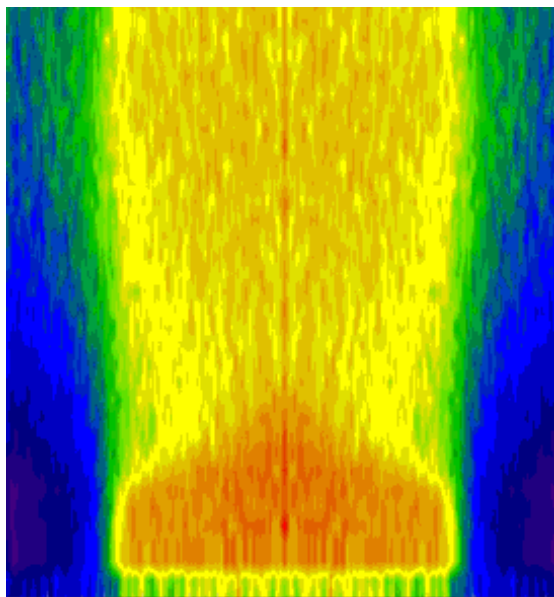


Рис. 2. In situ абсорбционный эксперимент по изучению процесса детонации на пучке СИ с помощью разработанного в ИЯФ сверхбыстрого однокоординатного детектора рентгеновского излучения DIMEX. Двумерная картина разлета продуктов детонации, полученная сложением 32 кадров, снятых детектором с разрешением 500 нс. По вертикальной оси снизу вверх – время от начала детонации, шкала от 0 до 16 мкс.

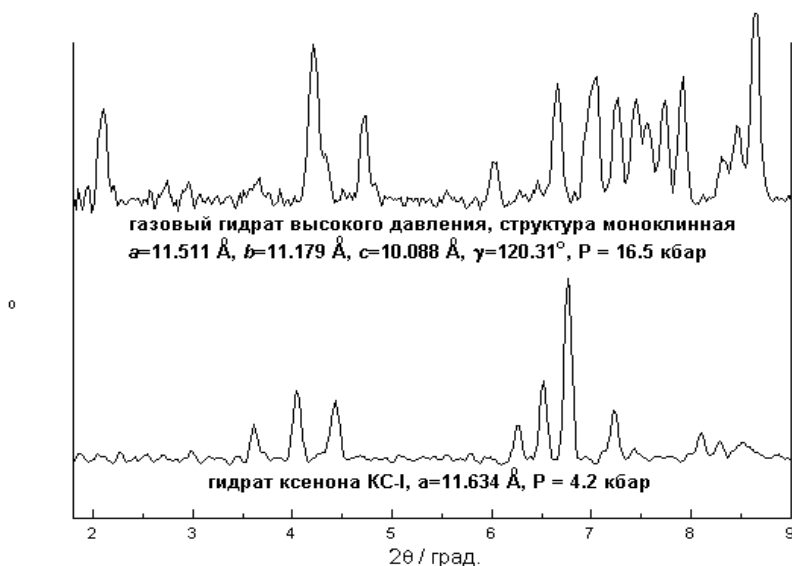
2.2. Изучение структуры газовых гидратов при высоких давлениях.

Интерес к исследованию газовых гидратов обусловлен важной ролью этих соединений как одной из компонент земной коры и перспективного источника углеводородного сырья. Газовые гидраты представляют собой так называемые соединения включения, в которых молекулы гидратообразователя (чаще всего газа или легколетучей жидкости) заполняют пустоты ажурного льдоподобного каркаса, построенного молекулами воды. Установлено, что во всех системах вода - гидратообразователь при повышении

давления до 0.5 - 3 и более кбар появляются новые фазы газовых гидратов. Однако информация о структурах газогидратных фаз высокого давления отсутствует. С целью ее получения с 2000 года проводятся эксперименты на станции “Дифрактометрия в области 30–34 кэВ, дифрактометрия при высоких давлениях” с использованием специально созданного аппарата “цилиндр-поршень” при давлении до 6.5 кбар и алмазных наковален для области более высоких давлений.

Газовые гидраты гексагональной структуры III (чаще называемой структурой H) занимают особое место среди трех известных структурных типов газовых гидратов. Наиболее существенным отличием является максимальный (до 10 Å) из известных для газовых гидратов размер большой E-полости этой структуры. Благодаря растворимости метилпиперазина в воде, системы с этим соединением очень удобны в качестве модельных для изучения гидратов структуры H при высоких давлениях. Кривые разложения гидратов, образующихся в системе метилпиперазин-ксенон-вода, были изучены до давления 10 кбар. Кривая имеет точку перегиба при давлении, свидетельствующую об образовании в системе новой фазы.

Для выяснения природы наблюдаемого фазового превращения было предпринято рентгенографическое исследование соединений, образующихся в системе метилпиперазин - ксенон - вода. Для опыта была взята смесь метилпиперазин - вода с мольным соотношением компонентов 1:34 (идеальная стехиометрия гидрата структуры H). Поскольку имеющееся оборудование для рентгенофазовых исследований при высоких давлениях требует использования некоторого избытка газа, в интервале давлений до 8 кбар в системе образовывался не гидрат структуры H, а ксеноновый гидрат кубической структуры I (Рис. 3, внизу) как это и наблюдалось при исследовании соответствующей фазовой диаграммы. При более высоких давлениях дифракционная картина совершенно



меняется (Рис. 3, сверху).

Рис. 3. Дифракционные картины, полученные при исследовании гидратов в системе метилпиперазин-ксенон-вода. Снизу - гидрат ксенона кубической структуры I. Сверху -

дифрактограмма фазы высокого давления двойного гидрата метилпиперазина и ксенона.

Интерпретировать эту дифрактограмму в рамках типичных газогидратных структур не удалось, при индексировании и последующем уточнении получена моноклинная элементарная ячейка $a = 11.511 \text{ \AA}$, $b = 11.179 \text{ \AA}$, $c = 10.088 \text{ \AA}$, угол $\gamma = 120.31^\circ$. Учитывая сходство полученной ячейки с гексагональной ячейкой, ожидаемой для гидратов структуры H, можно предположить что гидраты высокого давления в рассматриваемых системах образуются за счет искажения базовой гексагональной структуры гидрата низкого давления. Таким образом, было впервые показано что в системе метилпиперазин-ксенон-вода фаза высокого давления с большой долей вероятности соответствует искаженной структуре H.

2.3. Изучение процессов отверждения диффузионно-твердеющих сплавов в целях развития технологии холодной пайки.

На станциях “Дифрактометрия с высоким разрешением” и “Дифрактометрия в области 30–34 кэВ” продолжено изучение диффузионно-твердеющих сплавов (ДТС). Ранее изучались системы, получающиеся в результате взаимодействия медных порошков с галлий-оловянной эвтектикой. С целью улучшения механических свойств ДТС в 2002 году были исследованы процессы взаимодействия порошков никеля и твердого раствора олова в никеле с галлий-оловянной эвтектикой. Для получения ДТС, способных соединять детали в условиях высокого вакуума, исследовались системы Cu-Ga-In. Было показано, что в случае использования порошка из твердого раствора галлия в меди и галлий-индиевой эвтектики процесс образования ДТС сходен процессу образования с использованием галлий-оловянной эвтектики. Также происходит укрупнение кристаллитов интерметаллида CuGa_2 и образование прослоек из металлического индия. В случае использования систем на основе никеля процесс образование интерметаллидов отличается от ранее изученного. Зерна интерметаллида имеют значительно меньшие размеры. Выделение олова в виде отдельной фазы также не наблюдается.

2.4. Результаты работ на станции “Байкал”.

В 2002 г. на станции рентгенофлуоресцентного элементного анализа “Байкал” на накопителе ВЭПП-3 производились следующие исследования:

- Активно продолжались работы по сканирующему анализу донных осадков озер (Байкал и Телецкое). Эти работы были начаты в 2000 г. К настоящему времени получены данные по осадочной колонке из оз. Байкал по длине 3.5 м (2.5 м материала была изучена в 2002 г). Были также получены данные по 100-сантиметровой колонке Телецкого озера (совместно с Лимнологическим институтом СО РАН);
- Продолжались работы по сканирующему анализу годовых колец в древесных образцах. Были получены воспроизводимые данные по распределению элементов в образцах сибирской лиственницы из района Телецкого озера. Впервые были получены данные перекрывающие большой временной период (295 лет). Замечены интересные корреляции между концентрациями некоторых элементов и инструментальными метеорологическими данными. В данных работах участвовали сотрудники Лимнологического института и института Леса СО РАН.

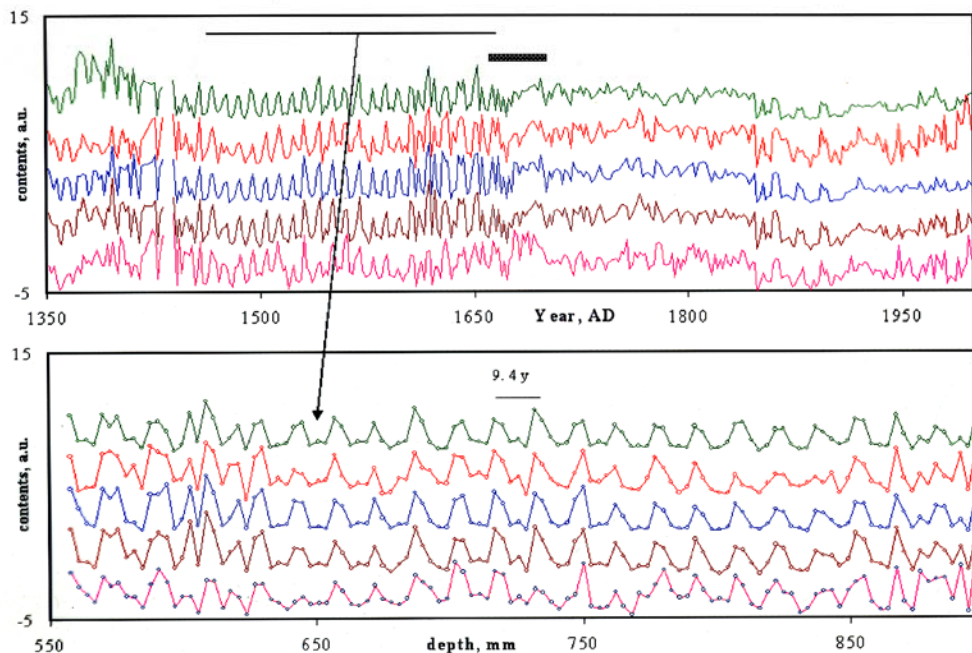


Рис. 4. Пример данных сканирующего анализа на станции “Байкал”. Быстрые климатические изменения (период ~ 9.4 лет). Керна донных осадков озера Телецкое.

- Изучение микроэлементного состава почечных конкрементов (камней) жителей Челябинской, Омской и Новосибирской областей. Анализировалось порядка 35-40 элементов, от К до Се по К-сериям и Pb, Th, U по L-сериям. Результаты позволяют сделать выводы о влиянии внешней среды (с учетом техногенных факторов) на внутренний элементный состав населения. Рассматриваются возможности практического применения методик для мониторинга геохимического фона территорий. Подготовлено 6 публикаций, заявлен проект РФФИ на 2003-2005 гг, Проведены методические работы по сканированию тонких петрографических шлифов (4 образца) почечных камней. (ОИГГиМ СО РАН);
- Проведено большое количество анализов экологической направленности;
- Группа из ИНХ совместно с сотрудниками института археологии СО РАН производили анализы находок из мест археологических раскопок.

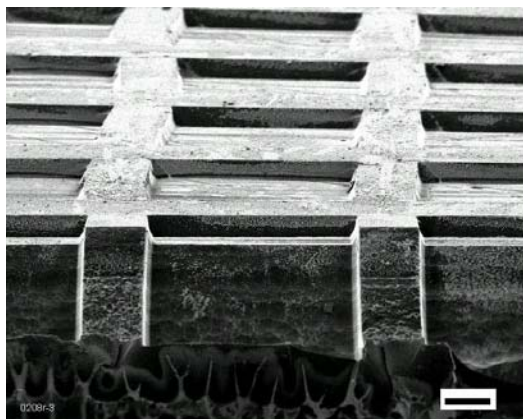
Общее количество проанализированных образцов в 2002 г превышает 5000. Кроме того, проведены первые эксперименты по анализу легких элементов в вакуумной камере для образцов на станции рентгеновской микроскопии и микротомографии (5-й канал). Произведены метрологические измерения, подтверждена возможность анализа Al, Si, P, S и Cl (совместно, ИЯФ с участием ОИГГиМ и ИНХ СО РАН).

2.5. Глубокая рентгеновская литография и LIGA-технология.

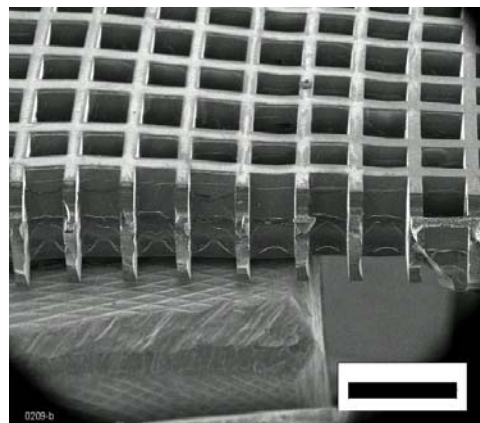
В 2002г. на станции "LIGA" велись работы по разработке способов изготовления микроизделий методом LIGA без использования рентгеновских шаблонов ввиду проблематичности приобретения их за рубежом и невозможностью приобретения их в РФ. Рассматриваются возможности изготовления в ИЯФ рентгеношаблонов для глубокой

рентгеновской литографии с микронными размерами элементов методом рисования топологии шаблона пучком рентгеновского СИ. Выполнены оценки параметров излучения и материалов для шаблонов, разрабатывается программное обеспечение для установки рисования, выполнены пробные облучения материалов и пропечатки тестовых рисунков с размерами элементов 100 мкм.

В 2003 г. планируется модернизация станции: установка точных подвижек с шагом 0.1- 0.5 мкм, системы обратной связи, доработка программного обеспечения, изготовление тестовых изделий с микронными и субмикронными размерами элементов.



100 μm



1000 μm

Рис. 5. Образцы структур, полученных на станции LIGA.

2.6. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез с предварительной мехактивацией.

При традиционном СВС в системе Ni+Al, когда смешиваются порошки с размерами порядка 10-100 микрон, калориметрия показывает тепловыделение в виде одного мощного пика (при этом температура достигает 2500 С). Однако, если те же порошки предварительно обработать в шаровой мельнице (мехактивировать), то на кривой тепловыделения будет уже несколько пиков и все они сместятся область значительно более низких температур. Более того, если обычной смеси всегда происходит плавление хотя бы одного из компонентов, то при СВС после мехактивации не обнаруживаются следы плавления даже самого легкоплавкого (Al). Для выяснения природы такого поведения активированных смесей были проведены эксперименты по их *"in situ"* отжигам на канале 5 накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Образцы медленно прогревались примерно от 150 С до 450 С одновременно со съемкой диффрактограмм. Последующая обработка показала, что в диапазоне 170-240 С происходит уменьшение ширины пика Ni, что было связано с отжигом накопленных дефектов кристаллической структуры. На кривых тепловыделения это совпадает с первым пиком. При дальнейшем нагреве происходит образование интерметаллида. Таким образом, на основе полученных данных было высказано предположение, что мехактивация не только способствует измельчению и приведению в более плотный контакт исходных частиц, но и "накачивает" их энергией

дефектов. Все это приводит к существенному снижению температуры СВС-процесса.

2.7. Другие “in situ” эксперименты.

Проведено первое “in situ” изучение промежуточных фаз реакции окисления метанола CH_3OH до H_2O и CO_2 (разработка низкотемпературного топливного элемента) при электрокатализе на халькогениде рутения методом EXAFS-спектроскопии. Время одной съемки составляло 4 часа с шагом 40 мин, на каждом шаге менялся приложенный потенциал.

Методом рентгеновской дифрактометрии проведено первое экспериментальное наблюдение обратимых фазовых переходов квазикристалл – кристалл – квазикристалл при нагреве и охлаждении соединения $\text{Mg}_{20}\text{Al}_6\text{Zn}_{14}$. Время одного цикла составляло 5 минут со съемкой спектра через 20 с.

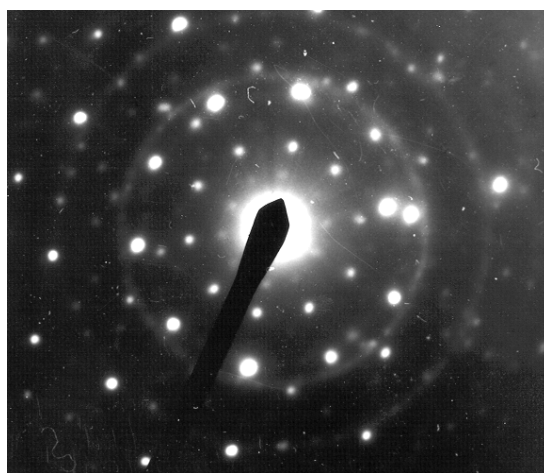


Рис. 6. Дифрактограмма квазикристалла (симметрия 5 порядка!) $\text{Mg}_{20}\text{Al}_6\text{Zn}_{14}$

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

3.1 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 работ на ускорительно-накопительном комплексе «Сибирь». выработан и стабильно воспроизводится стандартный режим работы, приемлемый для начала экспериментов с синхротронным излучением на первых трех осваиваемых экспериментальных станциях КИСИ.

3.2. Технологический накопительный комплекс (ТНК).

Накопитель-источник СИ “ТНК” для Зеленограда был спроектирован в ИЯФ к началу 90-х годов. Его основное назначение – производство интегральных схем с субмикронным размером элементов методом рентгеновской литографии на пучках СИ. Проектная энергия ТНК – 1.6 ГэВ, возможно ее увеличение до 2.5 ГэВ путем установки второго ускоряющего резонатора и увеличения мощности ВЧ-системы. Все системы ТНК были изготовлены в ИЯФ в период 1992 – 1996 г.г. В 1992 – 1995 г.г. в условиях снижения финансирования проводились договорные поставки элементов и систем ТНК в Зеленоград, однако к 1996 г. финансирование проекта было полностью прекращено. Оставшиеся элементы ТНК были заскладированы на территории ИЯФ.

С 2002 году финансирование проекта было возобновлено. Начата поэтапная сборка и запуск всех систем ТНК. Согласно договору на 2002 г., силами сотрудников ИЯФ (рук. В.Н. Корчуганов) был собран и запущен форинжектор, получен ток 30 мА при энергии 55 МэВ. В 2003 и последующие годы работы по сборке и запуску накопителя ТНК в Зеленограде будут продолжены.

3.3. 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 (инъекции/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.

ИЯФ спроектировал, изготовил и поставил в Японию прототип дипольного магнита для SAGA и выиграл тендер на изготовление элементов магнитной системы источника СИ, включая 16 дипольных магнитов, 40 квадрупольных линз и 32 секступольные линзы. Сроки выполнения очень жесткие. Начало работы потребителей на источнике СИ SAGA запланировано на 2004 г., а первые 8 поворотных магнитов должны быть отправлены заказчику до 1 июля 2003 года.



Рис. 7. Прототип дипольного магнита для SAGA.

3.4. Проект MARS.

В 1997 г. на конференции «SRI-97» в Японии в докладе Н.А. Винокурова, Г.Н. Кулипанова, А.Н. Скринского была представлена новая концепция источника СИ четвертого поколения, названного MARS (Multy-pass Accelerator Recuperator Source). Источник СИ “MARS” предлагается реализовать на основе не накопителя заряженных частиц, а разрезного микротрона-рекуператора.

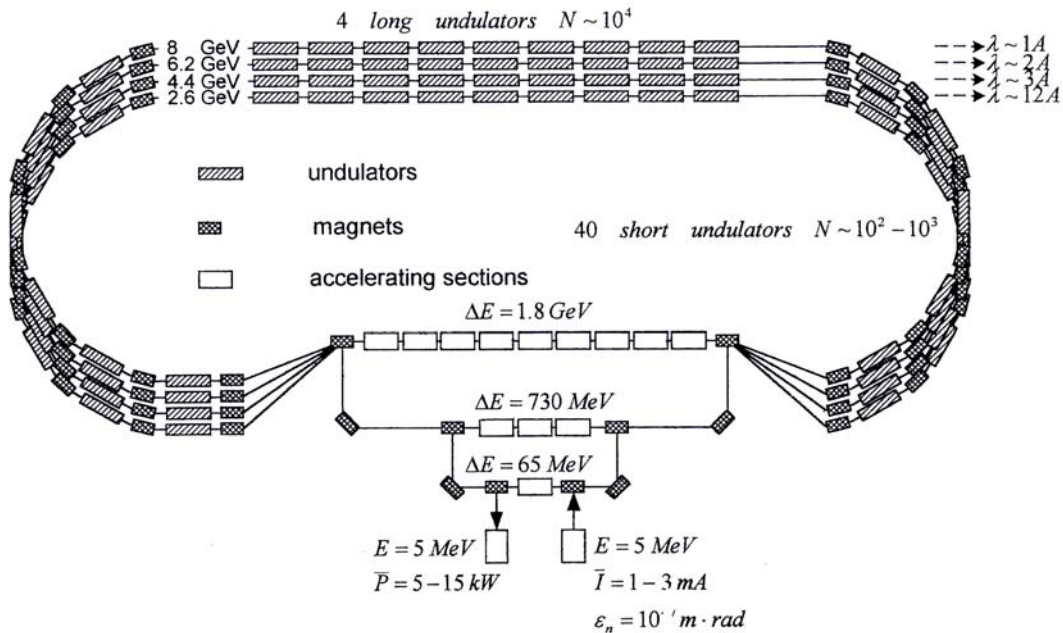


Рис. 8. Концептуальная схема источника СИ MARS (2002 г.)

После трех лет проработки в 2000 г. на Международной конференции “Synchrotron Radiation Instrumentation SRI-2000” (Берлин, Германия, 21-25 августа 2000 г.) был представлен проект источника СИ MARS на основе каскадной схемы из двух микротронов–рекуператоров и, наконец, в 2001-2002 г.г. сформировалась современная версия проекта (Рис. 8). Ее предполагаемые параметры: максимальная энергия электронов – 8 ГэВ, средний ток до 5-10 мА, горизонтальный эмиттанс меньше 0.01 нм·рад., относительный разброс энергий в пучке – 0.001%.

Дальнейшая работа над проектом MARS требует экспериментальной проверки и отработки основных принципов работы ускорителя-рекуператора. Эта работа уже начата в 2002 году на первой очереди ускорителя-рекуператора для лазера на свободных электронах Сибирского центра фотохимии, который служит также прототипом первой ступени источника рентгеновского излучения MARS. Параллельно с этим будет продолжена детальная разработка самого проекта MARS.

3.4. Сверхпроводящие вигглеры.

В 2002 году были продолжены контрактные работы по созданию сверхпроводящих вигглеров для зарубежных накопителей – источников СИ (Таблица 2). В частности, были созданы, смонтированы у заказчика и испытаны на накопителях сверхпроводящие вигглеры для генерации пучков СИ высокой яркости - 17-и полюсный вигглер с периодом 14 см и максимальным полем 7.35 Т для накопителя BESSY-II (Берлин, Германия) и 49-полюсный вигглер с периодом 6 см и магнитным полем 3.5 Т для накопителя ELETTRA (Триест, Италия).

Таблица 2. Сверхпроводящие вигглеры, на которых проводились различные виды работ в 2002 г. (поставка заказчику, постанровка на кольцо, запуск, вывод на проектные параметры).

Назначение	Год запуска (поставки)	Макс. поле, Т	Число полюсов (основных + корр.)	Зазор, мм	Длина полюса, мм	Полная магн. длина, мм	Вертикальная апертура, мм	Мощность СИ, кВт	Энергия ГэВ	Ток пучка e^- , А
SPring-8 (Japan)	2000	10.3	1+2	40	200	1042	20	100	8	0.1
PSF-WLS (BESSY-II, Germany)	2001	7.5	1+2	52	172	972	32	13	1.9	0.5
HMI- (BESSY-II, Germany)	2002	7.0	13+4	21	72	1360	14	56	1.9	0.5
ELETTRA (Italy)	2002	3.5	45+4	18	30	1680	11	6	2	0.1



Рис. 9. Сверхпроводящий вигглер для накопителя ELETTRA.

3.5. Несверхпроводящий вигглер с полем до 5 Т .

Концепция сильнополевых магнитных систем без использования сверхпроводимости впервые была предложена сотрудником ИЯФ П.Д. Воблым на основе анализа предельных возможностей гибридных систем (постоянный магнит из сплавов редкоземельных элементов + электромагнит + железный магнитопровод) при ограниченной (до 100 кВт) мощности источника питания.

Для проведения ряда экспериментов пучках СИ из ВЭПП-3, в частности исследования процессов детонации, необходимо увеличение интенсивности пучка СИ и смещение спектра излучения в более жесткую область. Поэтому было принято решение об установке сильнополевого гибридного вигглера и рассмотрены варианты его реализации. Выбранная схема 3-х полюсного вигглера позволяет получить поле до 5 Т при межполюсном зазоре 20 мм. В 2002 г. завершено конструирование и начато изготовление элементов вигглера. Также проведено конструирование и начато изготовление вакуумной камеры и приемников излучения для постановки вигглера на накопитель.

3.6. Ондуляторы.

В 2002 году изготовлены, протестированы на стенде магнитных измерений и установлены на микротрон-рекуператор два ондулятора для мощного ИК лазера Сибирского центра фотохимических исследований. Параметры ондуляторов: длина 4 метра, период 12 см, число периодов 32, максимальное поле 0.1 Т.

3.7. Источник ярких пучков медленных позитронов.

Разработанный в ИЯФ вигглер с полем до 10.3 Т для накопителя SPring-8 (Japan) является источником особо жесткого синхротронного излучения (энергия фотонов более 1 МэВ) и ключевым элементом для создаваемого российско-японского источника медленных позитронов (Рис. 10). В 1999 году была изготовлена и испытана магнитная система вигглера в собственном криостате и после успешных испытаний он был отправлен на накопитель SPring-8. В январе-феврале 2000 г. он был успешно запущен в Японии в стороне от накопителя. В 2002 г. вигглер был установлен на SPring-8 и начаты эксперименты с пучком при малых токах. Второй ключевой элемент проекта – модератор (замедлитель позитронов) находится в стадии разработки.

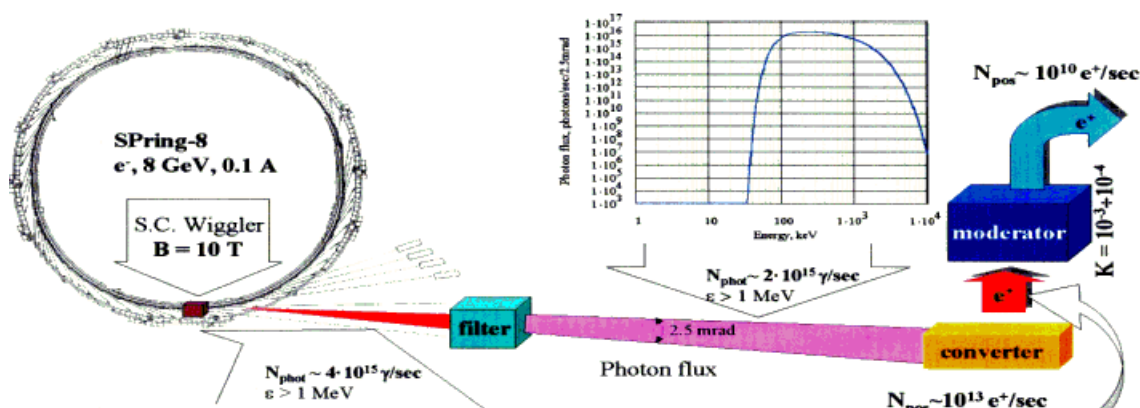


Рис. 10. Концептуальная схема источника яркого пучка медленных позитронов.

3.7. Сверхпроводящие соленоиды для накопителя ВЭПП-2000.

В ИЯФ был предложен новый подход для увеличения светимости установок со встречными позитрон-электронными пучками, основанный на получении круглых пучков, обеспечивающих существенное подавление эффектов встречи, что и дает увеличение светимости. Ключевыми элементами для реализации этой идеи на строящемся накопителе ВЭПП-2000 являются две пары сверхпроводящих сильнополевых соленоидов с полем 12 - 14 Т. В 2002 г. спроектирован, изготовлен и подготовлен к испытаниям первый из соленоидов с расчетным значением максимального поля 13 Т.

4. Запуск первой очереди ускорителя-рекуператора для мощного лазера на свободных электронах Сибирского центра фотохимических исследований.

16 июня 2002 года, девять лет спустя после принятия решения Президиума СО РАН о создании Сибирского центра фотохимических исследований, в ускорителе-рекуператоре первой очереди была осуществлена первая проводка пучка, а к концу года был получен "циркулирующий", т. е. ускоряемый до 12 МэВ, а затем замедляемый без потерь, электронный пучок. В этом разделе отчета обсуждаются статус и возможная экспериментальная программа Центра фотохимии на ближайшую перспективу.

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%) существующих ИК лазеров. Для создания промышленных фотохимических технологий требуется достичь уровня средней мощности ~ 10 кВт и более при монохроматичности не хуже нескольких сотых процента.

Работы по созданию ЛСЭ в России ведутся, в основном, в ИЯФ СО РАН, где получено много важных экспериментальных и теоретических результатов в этой области. В частности, ЛСЭ, запущенный в 1989 году, длительное время оставался самым коротковолновым в мире. Концепция создания мощного ЛСЭ, разработанная в ИЯФ, признана наиболее перспективной большинством специалистов по ЛСЭ. Результаты этих исследований неоднократно докладывались на семинарах в России и за рубежом, на международных конференциях, опубликованы в журналах *Nuclear Instruments and Methods* и *IEEE Journal of Quantum Electronics*.

Строящийся полномасштабный ЛСЭ на основе микротрона-рекуператора будет иметь диапазон перестройки от 2 до 50 микрон, генерируя 30-пикосекундные импульсы с энергией 1 миллиджоуль и средней мощностью до 100 кВт. По решению Президиума СО РАН № 314 от 15.12.92 на базе этого ЛСЭ создается Центр фотохимических исследований, который будет предоставлять излучение и пользовательские станции для проектов на конкурсной основе. ЛСЭ строится в специализированном отдельном корпусе ИХКиГ СО РАН. К настоящему моменту закончена модернизация здания N 11 ИХКиГ, разработан, смонтирован и запущен электронный инжектор ускорителя-рекуператора ЛСЭ. Изготовлена ВЧ-система ускорителя-рекуператора. Смонтирована общая дорожка ускорителя-рекуператора и каналы впуска и выпуска пучка. Полномасштабный проект ЛСЭ включает в себя восьмидорожечный микротрон-рекуператор на энергию 100 МэВ (рис. 11).

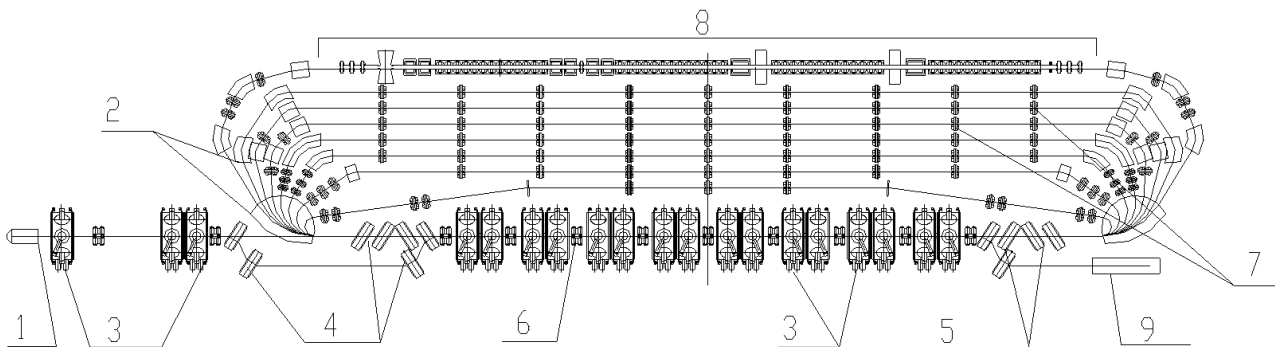


Рис. 11. Схема лазера на свободных электронах на основе ускорителя-рекуператора. 1 – электронная пушка, 2 – поворотные магниты, 3 – высокочастотные резонаторы, 4 – впускные магниты, 5 – выпускные магниты, 6 и 7 – квадрупольные линзы на общей и отдельных дорожках, 8 – магнитная система лазера на свободных электронах, 9 – поглотитель обработанного электронного пучка.

Обсуждение возможных экспериментов с сотрудниками Российских институтов показало, что десятки институтов смогут использовать уникальное излучение данной

установки, а большая мощность излучения позволит разрабатывать новые технологии, в частности, разделения изотопов.

4.1 Первая очередь ЛСЭ для центра фотохимии – субмиллиметровый лазер на свободных электронах со средней мощностью до 7 кВт

Как было указано выше, в настоящее время в г. Новосибирске ведутся работы по созданию мощного ЛСЭ инфракрасного диапазона. Первая очередь машины включает в себя полномасштабную ВЧ-систему микротрона-рекуператора и лишь один оборот пучка. Основные параметры ускорителя-рекуператора первой очереди таковы:

Таблица 3. Параметры ускорителя-рекуператора первой очереди.

Длина волны ускоряющего ВЧ, м	1.66
Число ускоряющих ВЧ-резонаторов	16
Амплитуда ВЧ на каждом резонаторе, МВ	0.8
Число орбит	1
Энергия инжекции, МэВ	2
Максимальная энергия электронов, МэВ	14
Частота повторения, МГц	2...22.5
Энергетический разброс в пучке, %	0.2
Длительность электронных сгустков, нс	0.02...0.1
Пиковый ток сгустка, А	50...10

На единственную обратную дорожку ускорителя-рекуператора первой очереди будет установлен ЛСЭ субмиллиметрового диапазона. ЛСЭ состоит из двух ондуляторов, группирователя, оптического резонатора с двумя зеркалами и устройства вывода излучения.



Рис. 12. Схема однопорожечного ускорителя-рекуператора и субмиллиметрового ЛСЭ.

Оба ондулятора - одинаковые плоские электромагнитные, длиной 4 м каждый, с периодом 120 мм, зазором 80 мм и К до 1. Может быть использован один из ондуляторов или оба вместе, в последнем случае может быть включен или отключен группирователь. Оба зеркала - одинаковые сферические медные, охлаждаемые водой. В выводе излучения использованы два или четыре плоских медных зеркала. Зеркала отклоняют часть

излучения с периферии резонаторной моды. Такая схема подавляет генерацию высших мод. Группирователь представляет собой электромагнитный трехполюсный вигглер.

Основные параметры ЛСЭ приведены в таблице 4.

Таблица 4. Основные параметры ЛСЭ первой очереди.

Длина волны излучения, мм	0.1...0.2
Длительность импульса, нс	0.02...0.1
Импульсная мощность, МВт	1...7
Средняя мощность, кВт	0.6...7

4.2 Основные результаты за 2002 год

- Подготовлены помещения для установки экспериментальных станций.
- Завершен монтаж ускорителя-рекуператора и получен "циркулирующий", т. е. ускоряемый до 12 МэВ, а затем замедляемый, электронный пучок.



Рис. 13. Ускоритель-рекуператор 1-й очереди (медианная плоскость сделана вертикальной, чтобы можно было монтировать УР 2-й очереди, не прекращая работу на первой). Вверху – ускоряющая структура из 16 резонаторов. Внизу видны ондуляторы ЛСЭ.

4.3. О терагерцовом излучении и перспективах работ в Сибирском центре фотохимии.

В 1998-1999 г.г., с началом работ по монтажу и запуску систем Сибирского центра

фотохимии, была сформирована концептуальная научная программа Центра, ориентированная на реализацию полномасштабного проекта – получение мощных (до 100 кВт) пучков ИК излучения с перестраиваемой длиной волны, прежде всего в ближней ИК области от 5 до 20 мкм (см. Ежегодные отчеты ИЯФ и Сибирского центра СИ за 1999-2001 г.г.). Одним из основных предлагаемых процессов в начальной программе была селективная многофотонная диссоциация молекул и основанное на ней разделение изотопов, включая массовое производство стабильных изотопов. Были рассмотрены и другие технологические и исследовательские приложения - обработка поверхности полимеров, модификация поверхности синтетических волокон, лазерный катализ, реакции колебательно возбужденных молекул с атомами и свободными радикалами, создание опорного пункта для зондирования атмосферы и ряд других предложений институтов СО РАН.

С запуском в 2002 году первой очереди ускорителя-рекуператора и перспективой получения в ближайшее время рекордного по мощности пучка излучения с перестраиваемой длиной волны, но в более дальней (называемой терагерцовой) области, возникает необходимость уточнить главные направления исследований и состав экспериментальных станций Центра фотохимии на среднесрочную перспективу (ближайшие 5-7 лет).

Для более детального обсуждения вопросов и предложений, связанных с генерацией, детектированием и применением излучения терагерцового диапазона, с 5 ноября 2002 года в Сибирском центре фотохимии (ИХКиГ СО РАН) начал свою работу регулярный Межинститутский междисциплинарный семинар «Терагерцовое излучение и его применение». Председатель семинара Г.Н. Кулипанов, секретарь Б.А. Князев, периодичность проведения – 1 раз в две недели. Ожидается, что на базе этого семинара будет сформирована команда пользователей и сформулирована программа первых экспериментов на ЛСЭ, запускаемом в ближайшее время в фотохимическом центре.

Терагерцовым излучением (ТИ) обычно называют область на шкале электромагнитных волн между 20 мкм и 3 мм (излучение выше 20 мкм называют также дальним инфракрасным излучением (ДИК), причем в качестве его верхней границы называют и 50, и 1000 мкм). Некоторые авторы используют для этого спектрального диапазона термин «Т-лучи», который можно использовать как удобное сокращение. Фон теплового излучения в терагерцовом диапазоне весьма высок, что приводит к необходимости использовать криогенные детекторы. В течение длительного времени отсутствовали источники излучения в субмиллиметровой области, а внеземное ТИ практически полностью экранируется атмосферой. По этим причинам эта область до последнего времени была практически недоступна для исследований.

Появление субмиллиметровых газовых лазеров, генерирующих на ряде фиксированных длин волн от 18,3 мкм ($^{10}\text{BrCl}_3$) до 1253,738 мкм (CH_3I), было важным шагом в освоении терагерцового диапазона. Однако настоящий бум в этой области начался после изобретения в начале 1980-х метода генерации и регистрации широкополосного терагерцового излучения с помощью фемтосекундных лазеров, названного terahertz time-domain spectroscopy (TDS), или в русском варианте спектроскопией высокого временного разрешения (СВВР).

Следующим важным шагом в освоении терагерцового диапазона явилось создание лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), способных генерировать узкополосное перестраиваемое излучение с гораздо более высокой средней и импульсной мощностью.

Из Таблицы 5 видно, что проектные параметры двух ЛСЭ Сибирского центра фотохимических исследований значительно превышают параметры существующих лазеров (характеристики излучения зарубежных ЛСЭ, работающих в терагерцовом диапазоне и доступных для пользователей, заимствованны из обзора G.R. Neil).

Таблица 5. Характеристики излучения ряда уже работающих и проектируемых ЛСЭ терагерцового диапазона.

Страна	Лаборатория	Название	λ , мкм	t, пс	P_{peak} , МВт	$P_{средняя}$, Вт
США	Stanford	FIREFLY	19-65	1-5	0,3	0,4
	UCSB	CTST	2500-30	10 ⁶	0,006	0,4
Япония	Osaka	FELI 4	20-80	1,7	5	1
Нидерланды	FOM	FELIX-2	5-35	0,5-10	2	1
		FELIX-1	25-110	1-10	2	0,5
Германия	Rosendorf	ELBE	5-150	5	7	400
Россия	Новосибирск, Центр фотохимии	FEL, 1-я очередь (проектные)	100-200	20-100	1-7	600-7000
Россия	Новосибирск, Центр фотохимии	FEL, 2-я очередь (проектные)	5-50	30	30	100000

Терагерцовый диапазон представляет большой интерес для исследователей по нескольким причинам. Во-первых, собственные частоты многих физических и химических процессов лежат в этом диапазоне. Во-вторых, эта спектральная область является белым пятном практически для всех разделов науки и техники и уже по этой причине здесь можно ожидать самых неожиданных открытий. Ситуация в чем-то напоминает первые годы развития лазерной техники, которая произвела переворот в современном мире, проникая в самые неожиданные области. Уже сейчас успехи в генерации и детектировании когерентных коротких импульсов ТГц-излучения инициализировали широкие фундаментальные и прикладные исследования. Исследование новых терагерцовых источников и детекторов, физика полупроводников, нелинейная оптика, получение изображений в терагерцовой области, терагерцовая спектроскопия, анализ живописи, биологические и медицинские приложения, исследования атмосферы и космического пространства - вот неполный список современных областей исследований.

Можно ожидать, что появление перестраиваемых источников терагерцового диапазона даст импульс к исследованиям, в том числе и с высоким временным разрешением, в области химии сложных органических молекул, имеющих собственные частоты различных типов колебаний в терагерцовом диапазоне. Применение для

разделения изотопов очень перспективно, но возможно лишь для излучения самой коротковолновой части терагерцового диапазона, если не будут найдены специфические схемы, использующие и более длинноволновое излучение.

Применение терагерцового излучения позволяет исследовать внутреннюю структуру объектов, непрозрачных для видимого света и абсолютно прозрачных для рентгеновского излучения. Были, в частности, построены изображения, позволившие найти распределение концентрации и подвижность носителей заряда в электронном и дырочном полупроводниках. Визуализация в Т-лучах была продемонстрирована на живом листе с сидящим насекомым, флоппи-диске, водяных знаках на банкнотах, пластиковых объемах с разными газами, контейнере с порошком, в котором был спрятан некий предмет и многих других объектах. Для визуализации в медицине существенно, что ТИ не является ионизирующим и при низких дозах может использоваться для проведения анализов в естественных условиях.

Появление в ближайшие годы нескольких лазеров на свободных электронах со средней мощностью от 1-5 до 100 киловатт откроет новые возможности для приложений, которые требуют высокоэнергетических потоков. Большая часть работ в этом направлении, очевидно, будет носить поисковый характер, хотя такие работы как разделение изотопов, вероятно сразу можно ставить на промышленную основу. Терагерцовый атмосферный и внеатмосферный лидар заведомо представляет интерес для практики и исследования в этом направлении также должны проводиться.

Другой областью применения может стать обработка материалов как непосредственно излучением лазера, так и путем создания с помощью поверхностных терагерцовых волн приповерхностной плазмы. Мощные импульсы излучения большого сечения можно применить для просвечивания ряда веществ, больших объемов сушки слабо поглощающих терагерцовое излучение веществ, избирательном воздействии на малые вкрапления в рудах и минералах [предложение ИГД СО РАН]. Последнее применение кажется особенно перспективным в связи с уже упомянутым ранее малым рассеянием длинноволнового излучения в мелкодисперсных средах.

Очевидно, что возможности применения терагерцовых ЛСЭ не ограничиваются упомянутыми выше приложениями. Мы не упомянули в этом контексте полупроводниковые материалы, биологические объекты и многие другие сферы, для которых специалисты в соответствующих областях, без сомнения, найдут интересные применения для мощных ЛСЭ.

5. XIV Российская конференция по использованию синхротронного излучения (СИ-2002).

С 15 по 19 июля в ИЯФ прошла XIV Российская конференция по использованию синхротронного излучения (СИ-2002). В работе Конференции СИ-2002 приняли участие представители 77 организаций и научных институтов. Всего было представлено 52 устных доклада и 131 стендовый. Представили их 208 участников: 189 российских ученых из городов Бийск, Дубна, Екатеринбург, Ижевск, Иркутск, Красноярск, Москва, Нижний Новгород, Новосибирск, Пущино, Ростов-на-Дону, Санкт-Петербург, Саратов, Саров, Снежинск, Сургут, Томск, Черноголовка и 19 иностранных гостей из Англии, Франции, Германии, США, Швеции, Южной Кореи, Тайваня и Японии.

Десять пунктов научной программы конференции можно сгруппировать в виде двух основных научных направлений:

- ◆ Создание источников синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах.
- ◆ Использование СИ для исследовательских и технологических целей и разработка соответствующей аппаратуры.

Статусы и перспективы развития двух действующих российских центров синхротронного излучения: Сибирского центра СИ и Курчатовского источника СИ (КИСИ) были изложены в пленарных докладах Г.Н. Кулипанова и В.Н. Корчуганова. Все четыре действующих сейчас в России накопителя-источника СИ первого и второго поколений: Сибирь-1 (0.45 ГэВ), ВЭПП-3 (2.0 ГэВ), Сибирь-2 (2.5 ГэВ) и ВЭПП-4М (до 6 ГэВ) разработаны и изготовлены в ИЯФ и составляют одну шестую часть мирового парка подобных установок. Российские источники СИ позволяют разместить на них более 50 исследовательских станций одновременно (реально пока запущено 15 станций).

Третий российский центр СИ создается в ОИЯИ, Дубна. Проект “Дубненский электронный синхротрон” (ДЭЛСИ) имеет целью создание источника синхротронного излучения “почти третьего поколения”. Источник ДЭЛСИ создается на базе оборудования ускорительного комплекса, переданного в ОИЯИ из Института ядерной физики и физики высоких энергий (NIKHEF), г. Амстердам, Нидерланды. При участии ИЯФ параметры пучков СИ из ДЭЛСИ будут существенно улучшены. В настоящее время рассматриваются два проекта: во-первых, установка одного или двух сверхпроводящих вигглеров с полем до 10 Т, производимых в ИЯФ, для генерации очень жесткого СИ, во-вторых, установка разрабатываемых в ИЯФ гибридных магнитов с полем до 5 Т. О состоянии работ по реализации проекта было рассказано в докладе бывшего сотрудника ИЯФ, чл.-корр. РАН И.Н. Мешкова.

Об успехах наших японских коллег было рассказано в двух пленарных докладах: статус накопителя SPring-8 (Prof. A.Kira, директор SPring-8) и о применениях СИ в промышленности (Prof. J.Chikawa, CAST).

Разработке принципиально новых источников синхротронного излучения четвертого поколения был посвящен доклад Г.Н. Кулипанова “Новая концепция источников СИ, основанных на линейном ускорителе-рекуператоре”. Источник СИ “MARS” предлагается реализовать на основе не накопителя заряженных частиц, а микротрона-рекуператора. При этом для каждого сгустка электронов реализуется однопролетный режим излучения в магнитном поле и различные диффузионные явления не успевают увеличить эмиттанс и энергетический разброс. Излучение из ондуляторов на таком ускорителе может превосходить по яркости источники СИ третьего поколения в диапазоне длин волн 0.1–4 нм на два - три порядка.

О признании мировым научным сообществом выдвинутой в 1997 году в ИЯФ концепции источника СИ MARS свидетельствует представленный на конференции доклад Д. Билдербека (Cornell University, США). Корнельский проект предполагает разработку и создание источника СИ на основе однооборотного ускорителя-рекуператора с энергией 5-7 ГэВ. Как и в Новосибирском проекте, на первом этапе для экспериментальной проверки и отработки принципов работы ускорителя-рекуператора планируется создание прототипа с энергией до 100 МэВ. Доклады, сделанные профессором Билдербеком и профессором Жоленцом (Беркли), показали, что уже в ближайшие 5-7 лет источник синхротронного излучения на базе ускорителя-рекуператора имеет реальные шансы заработать.

На СИ-2002 было представлено несколько очень интересных работ по лазерам на

свободных электронах, в том числе и самого молодого из выступавших с устными докладами участников Д.А. Кайрана (ИЯФ) о статусе строящегося Сибирского центра фотохимических исследований, на первой очереди ускорителя-рекуператора которого в июне нынешнего года был получен ускоренный и замедленный пучок электронов.

Многополюсным магнитным системам для генерации СИ был посвящен доклад Н.А. Мезенцева, В.А. Шкарубы и др. “Сверхпроводящие генераторы СИ, производимые в ИЯФ”. Интерес к сверхпроводящим вигглерам в мире объясняется уникальной возможностью сместить спектр излучения уже построенных источников СИ в более коротковолновую область и значительно увеличить мощность излучения. Всего за период 1979-2002 г в ИЯФ произведено 11 подобных вигглеров с максимальным магнитным полем от 3.5 до 10.3 Т, три из которых размещались на накопителях ИЯФ, один на накопителе “Сибирь-1” (Москва), а остальные на зарубежных источниках СИ в Республике Корея, США, Японии и Германии.

На конференции было представлено более 100 тематических докладов по экспериментам с использованием СИ и разработке сопутствующей аппаратуры. Среди наиболее интересных работ следует выделить доклад Е.Л. Гольдберга (ЛИН, Иркутск) о реконструкции палеоклимата Сибири за последние полмиллиона лет путем анализа кернов бурения донных осадков озера Байкал, доклады академика В.М.Титова (ИГиЛ, Новосибирск) и Б.П.Толочко (ИХТТМ, Новосибирск) о исследованиях процессов детонации и поведения вещества в детонационном фронте. Широкий обзор элементов и предельных возможностей современной рентгеновской оптики был проведен в серии пленарных докладов А.Снигирева (ESRF, Гренобль, Франция), В.В.Аристова (ИПТМ, Черногловка) К.А.Прохорова (ИФМ, Нижний Новгород) и В.А.Чернова (ИК, Новосибирск).

Проведенная конференция позволила ее участникам обменяться последними результатами своих работ и определить направления научного сотрудничества с коллегами из России и из-за рубежа.