

УДК 621.384.6.01(675.8)

© 1998 г. **ВИНОКУРОВ Н.А., ЗОЛОТАРЕВ К.В., КОРЧУГАНОВ В.Н., КУЛИПАНОВ Г.Н., МЕЗЕНЦЕВ Н.А., ОРЕШКОВ А.Д., ПАНЧЕНКО В.Е., ПИНДЮРИН В.Ф., СКРИНСКИЙ А.Н., ТОЛОЧКО Б.П., ЧЕРНОВ В.А., ШЕРОМОВ М.А.**

### **ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА СИБИРСКОГО ЦЕНТРА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В последнее десятилетие в Сибирском центре синхротронного излучения проводятся обширные исследования с использованием синхротронного излучения в спектроскопии, метрологии, материаловедении и по программе “Лазеры на свободных электронах” в тесном сотрудничестве с российскими и зарубежными исследовательскими центрами. В данной статье описаны эти исследования, включающие совместные эксперименты с использованием СИ из источников Института ядерной физики (Новосибирск), подготовку новых экспериментов, а также разработку и установку аппаратуры, разработанной и собранной в ИЯФ. Дается также техническая информация о накопителях – источниках СИ, вигглерах, ондуляторах и лазерах, разработанных, произведенных или используемых в ИЯФ.

#### **Введение**

В настоящее время Сибирский центр синхротронного излучения (СЦСИ), основанный на базе нескольких лабораторий Института ядерной физики им. Г.И. Будкера (БИЯФ) является крупнейшим центром синхротронного излучения (СИ) и исследований с помощью лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) в России. Основными направлениями научной программы центра являются:

- проведение экспериментов и развитие новых методик использования СИ из источников накопителей ВЭПП-2М, ВЭПП-3 и ВЭПП-4;
- разработка экспериментальной рентгеновской аппаратуры (каналы вывода СИ, рентгеновская оптика, детекторы);
- разработка накопителей – специализированных источников СИ, разработка элементов накопителей для генерации СИ – вигглеров и ондуляторов;
- разработка лазеров на свободных электронах.

Источники финансирования Центра:

- российская государственная программа “Синхротронное излучение и лучевые технологии”;
- целевое финансирование работ по ЛСЭ;
- гранты российских и международных фондов поддержки развития науки и технологии;
- контракты с различными организациями в России и за рубежом;
- международное сотрудничество.

#### **Источники СИ в Институте ядерной физики**

Три накопителя Института ядерной физики используются как источники СИ – ВЭПП-2М, ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Схема расположения комплексов представлена на

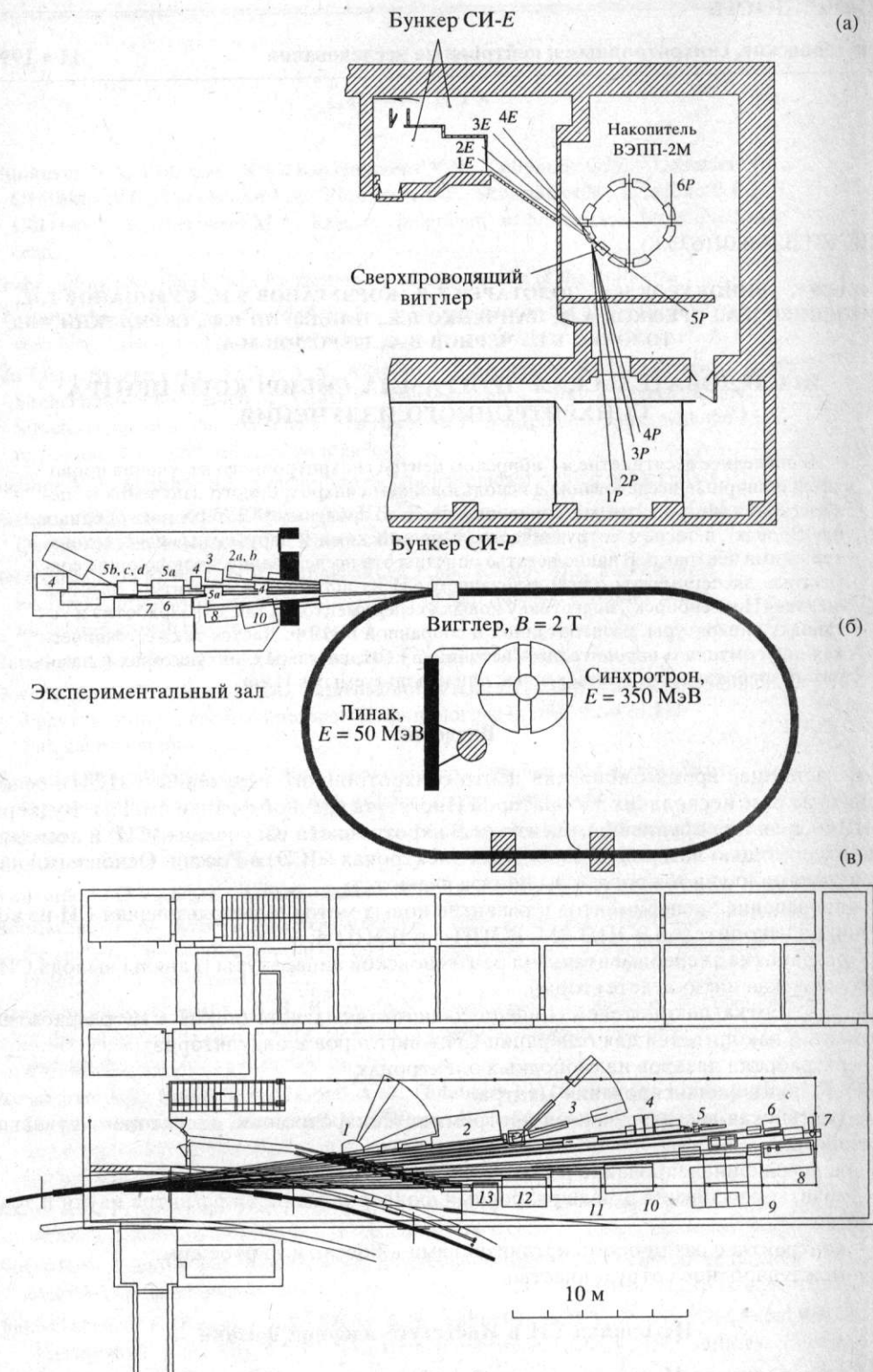


Рис. 1. Схемы расположения накопителей Сибирского центра СИ: а – ВЭПП-2М, б – ВЭПП-3, в – ВЭПП-4.

Основные параметры накопителей-источников СИ в Сибирском центре СИ

	ВЭПП-2М	ВЭПП-3	ВЭПП-4М
Энергия, ГэВ	0.7	2.0	6.0
Периметр, м	17.88	74.4	366
Тип частиц	$e^-, e^+$	$e^-$	$e^-, e^+$
Количество сгустков	Один или много	Один или два	Один или много
Эмитанс, см · рад	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Ток, мА:			
общий	300 (150 $e^-$ и 150 $e^+$ )	250	80
в одном сгустке	200 ( $e^-$ или $e^+$ )		40
Время жизни пучка, ч	1-2	3-4	4-6
Магнитное поле в поворотных магнитах, Т	1.91	1.08	1.3
Период обращения, нс	59.6	248	1200
Длина сгустка $2\sigma_z$ , см	8	30	5
Генераторы СИ	Сверхпроводящий вигглер (табл. 5)	3-полюсный вигглер, 11-полюсный вигглер (табл. 6)	Вигглер (табл. 6)
Поперечные размеры пучка в точке излучения:			
$2\sigma_x$ , мм	2.7 в поворотном магните 1.0 в вигглере	1.8	3
$2\sigma_z$ , мм	0.17 в поворотном магните 0.03 в вигглере	0.12	0.8
Критическая длина волны, Å:			
из поворотного магнита	19.9	4.31	0.51
из вигглера	5.1	2.3	0.4
Количество каналов СИ:	9	9	14
из поворотного магнита	6 ( $2-e^-, 4-e^+$ )	1	13
из вигглера	3 ( $2-e^-, 1-e^+$ )	8	1

рис. 1, а их параметры – в табл. 1. Список существующих и проектируемых экспериментальных станций приведен в табл. 2.

Для проведения исследований в области вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения ( $\lambda = 5 \cdot 10^3 - 2 \text{ \AA}$ ) используется накопитель ВЭПП-2М. Схема накопителя и помещений для проведения исследований с использованием СИ представлена на рис. 1а. Излучение электронных пучков из сверхпроводящего вигглера (каналы 1E и 2E) и из поворотного магнита (каналы E и 4E) выводится в зал СИ-E общей площадью 80 м<sup>2</sup>. Излучение позитронных пучков выводится из поворотного магнита по каналам 1P-4P в зал СИ-P площадью 48 м<sup>2</sup>. Специальная станция измерения параметров позитронных пучков расположена в отдельной комнате на канале 5P. И наконец, станция изучения фотостимулированной десорбции газа находится непосредственно в рабочем зале накопителя на канале 6P.

В настоящее время накопитель ВЭПП-3 есть основной источник СИ в рентгеновском диапазоне в СЦСИ (рис. 1б). Излучение генерируется специализированным трехполюсным вигглером с полем 2 Т, установленным в прямолинейной секции накопителя. Магнитное поле во всех полюсах приблизительно одинаковое. СИ выходит через бериллиевые фольги с суммарной толщиной 0.8 мм, разделяющие вакуум накопителя и каналов. Полный горизонтальный угол излучения из вигглера составляет 120 мрад и делится на 8 частей каналами вывода СИ. Шесть каналов пропускают излучение в угле 5 мрад и два канала – 8 мрад. Канал 9 выводит излучение из поворотного магнита с полем 1.7 Т через фольгу толщиной 30 мкм в сверхвысоковакуумный

Список экспериментальных станций в Сибирском центре СИ

Номер канала	Источник излучения	Станции
<b>Накопитель ВЭПП-2М</b>		
1E(e <sup>-</sup> )	Вигглер	Не используется
2E(e <sup>-</sup> )	Вигглер	Не используется
3E(e <sup>-</sup> )	Поворотный магнит	Фото-электронная спектроскопия
4E(e <sup>-</sup> )	Поворотный магнит	Не используется
1P(e <sup>+</sup> )	Поворотный магнит	Не используется
2P(e <sup>+</sup> )	Поворотный магнит	Спектроскопия с временным разрешением
3P1(e <sup>+</sup> )	Поворотный магнит	Рентгеновская метрология
3P2(e <sup>+</sup> )	Поворотный магнит	ВУФ-спектроскопия и метрология
4P(e <sup>+</sup> )	Поворотный магнит	Стимулированная фотодесорбция (SSC-1)
5P(e <sup>+</sup> )	Вигглер	Измерение параметров позитронного пучка
6P(e <sup>+</sup> )	Поворотный магнит	Стимулированная фотодесорбция (SSC-2)
<b>Накопитель ВЭПП-3</b>		
2	Вигглер	Дифрактометрия с высоким разрешением и аномальное рассеяние
3	Вигглер	Рентгено-флуоресцентный элементный анализ
4	Вигглер	Разностная ангиография
5	Вигглер	а) Рентгеновская микроскопия и микротомография б) Дифрактометрия с временным разрешением в) Кристаллография макрокристаллов г) Неупругое рассеяние д) Малоугловое рассеяние
6	Вигглер	Спектроскопия с временным разрешением
7	Вигглер	LIGA и рентгеновская топография
8	Вигглер	EXAFS-спектроскопия
10	Поворотный магнит	Рентгеновская литография
<b>Накопитель ВЭПП-4М</b>		
1	Поворотный магнит (0.8 T)	Энергодисперсионная EXAFS-спектроскопия
2	Поворотный магнит (1.3 T)	EXAFS-спектроскопия
3	Поворотный магнит (1.3 T)	Дифракционное кино
4	Поворотный магнит (1.3 T)	Элементный анализ
5	Поворотный магнит (0.9 T)	Малоугловая дифрактометрия
6	Поворотный магнит (0.9 T)	Аномальное рассеяние
7	Поворотный магнит (1.3 T)	Энергодисперсионная дифрактометрия
8a	Вигглер	Медицина
8b	Вигглер	Микроскопия
9	Поворотный магнит (1.35 T)	Неупругие процессы
10	Поворотный магнит (1.35 T)	Метрология
11	Поворотный магнит (0.95 T)	Калибровка
12	Поворотный магнит (0.95 T)	LIGA
13	Поворотный магнит (1.35 T)	Резерв
14	Поворотный магнит (1.35 T)	Технический канал

объем с дифференциальной откачкой. В 1996 г. на накопитель ВЭПП-3 был установлен одиннадцатиполосный вигглер для получения интенсивных пучков СИ в новой станции LIGA-технологии. Специальная конструкция вигглера позволяет варьировать спектр излучения в диапазоне 1–10 Å без возмущения орбиты электронов и обеспечивает повышенную однородность распределения мощности излучения на обрабатываемом образце.

Недавно был реализован проект модернизации накопителя ВЭПП-4М. Основные изменения сделаны в элементе периодичности. В серединах обоих полуколец группы стандартных поворотных магнитов заменены на магниты С-образной формы. Конструкция магнитов обеспечивает простой вывод СИ через специальную вакуумную ка-

меру. Магнитное поле в новых магнитах было увеличено, это позволило уменьшить длину магнитов и обеспечить свободное пространство (1.8 м) для установки в прямолинейных секциях дополнительных устройств генерации СИ. В одном промежутке планируется установить семиполусный вигглер с полем 1.5 Т.

Закончено строительство специализированного здания (бункера) для размещения экспериментальных станций. Общая площадь бункера составляет ~1200 м<sup>2</sup>. В бункере предполагается разместить 14 каналов вывода СИ и около 20 станций (рис. 1в). К текущему моменту вакуумная камера, а также узлы стыковки для 14 каналов вывода изготовлены, установлены на накопитель. Проведены первые работы по трассировки пучков СИ через стыковочные узлы.

### Работы по использованию СИ

Исследования, проводимые в Сибирском центре СИ, перекрывают широкий спектр научных и технологических задач. Общее количество публикаций в российских и международных журналах по результатам данных исследований превышает 1400. Рис. 2 представляет ежегодную динамику количества публикаций.

Штат центра в основном состоит из групп новосибирских институтов СО РАН. Эти команды, как правило, являются хозяевами экспериментальных станций. В исследованиях также участвуют иногородние команды из научных, промышленных и отраслевых институтов, группы из различных вузов как российских, так и зарубежных. Рис. 3 иллюстрирует динамику числа групп, работающих в центре, начиная с 1973 г. Уменьшение количества групп в 1986–87 гг. вызвано пожаром, случившемся в Институте ядерной физики в августе 1985 г. Второй спад после 1990 г. вызван изменениями в политической и экономической ситуации в странах Восточной Европы и в республиках бывшего Советского Союза. Внезапное урезание научных фондов, резкое увеличение цен на проездные билеты и на проживание в гостиницах привело к снижению исследовательских групп из европейской части России.

Главные направления исследований с использованием СИ коротко описаны ниже.

**1. Физика ускорителей.** Некоторые экспериментальные станции используются для изучения различных аспектов в физике ускорителей и накопителей. Например, в 1996 г. проводились работы на двух станциях ВЭПП-2М по изучению фотодесорбции газа, стимулированной СИ со стенок прототипа вакуумной камеры суперколайдера. Эти работы проводились в рамках контракта, заключенного с ЦЕРН. Кроме этого, на канале 3P2 накопителя

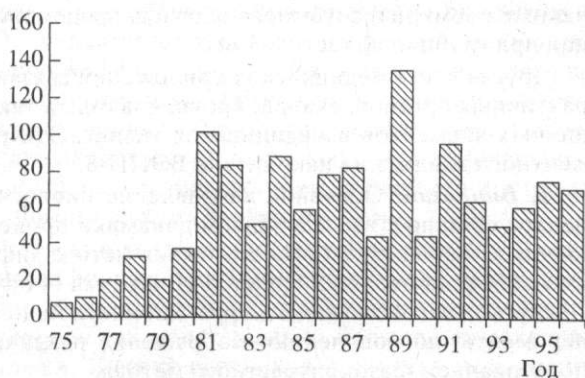


Рис. 2. Количество публикаций Сибирского центра СИ.

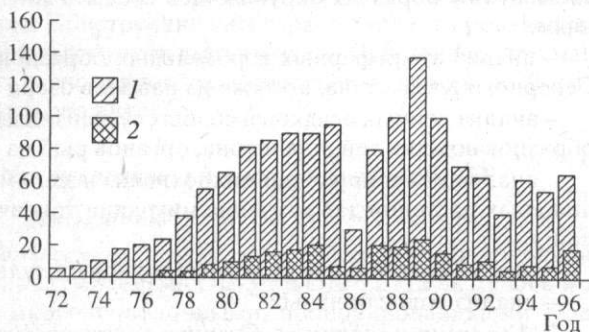


Рис. 3. Количество групп, работающих в Сибирском центре СИ: 1 – русские группы, 2 – иностранные группы.

ВЭПП-2М была разработана методика вакуумных измерений для давлений  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  Торр по ультрафиолетовой люминесценции остаточного газа.

**2. Рентгеновская метрология.** Большое количество экспериментальных работ были выполнены по абсолютной калибровке рентгеновских детекторов. Спектральная чувствительность и временные характеристики разнообразных рентгеновских детекторов изучались в относительно жестком рентгеновском диапазоне (5–20 кэВ) на накопителе ВЭПП-3 (станция рентгеновской микроскопии и микротомографии) и в диапазоне 0.1–1 кэВ на накопителе ВЭПП-2М (станция рентгеновской метрологии).

**3. Материаловедение.** Исследования различных материалов – одно из главных направлений Сибирского центра СИ. Эти исследования проводятся на станциях EX-AFS-спектроскопии, аномального рассеяния и дифракционного кино, спектроскопии с временным разрешением, рентгено-флуоресцентного анализа, рентгеновской микроскопии и микротомографии. Ряд исследуемых образцов весьма широк. Как правило, исследования проводятся с использованием нескольких взаимодополняющих методов.

**4. Медицина.** В последнее время на станции разностной ангиографии была продемонстрирована возможность визуализации лимфатических узлов у живой крысы с использованием техники разностного поглощения на *K*-крае поглощения йода.

Новым направлением исследований в этой области является разностная бронхография легких на *K*-крае ксенона. Если пациент вдыхает смесь кислорода и ксенона в пропорции 4 : 1 (азот воздуха заменяется ксеноном), то распределение ксенона может быть легко визуализировано вычитанием изображений, снятых при энергиях квантов чуть выше и чуть ниже *K*-края ксенона. Предварительные результаты, полученные съемкой фантомного образца, продемонстрировали возможность визуализации при глубине полости 0.5 мм.

Другая часть медицинских приложений связана с изучением элементного состава различных органов, тканей, крови, плазмы, а также с изучением распределений различных элементов в медицинских тканях. Эти работы проводятся на станции элементного анализа на накопителе ВЭПП-3.

**5. Биология.** Основное направление биологических исследований в Сибирском центре связано с исследованием динамики процессов напряжения и релаксации мышечных тканей путем использования метода дифракции с временным разрешением. Эта работа проводится группой Института биофизики РАН (г. Пущино) на станции малоуглового рассеяния и дифракционного кино. На этой же станции проведены эксперименты по получению изображений различных биологических объектов с использованием фазоконтрастного метода.

**6. Экология.** Большая часть экологических исследований проводится на станции рентгенофлуоресцентного анализа и связана с изучением содержания различных элементов в образцах окружающей среды. Работы велись по следующим направлениям:

- анализ атмосферных аэрозольных образцов из различных регионов Сибири и Северного Казахстана, а также из районов озера Байкал;
- анализ донных осадков и водных суспензий из Новосибирских водоемов, а также образцов водорослей, планктона, органов рыб на наличие техногенных загрязнений;
- анализ и сканирующий микроанализ насекомых (бабочек лугового мотыля) и их пищевых растений для изучения миграции токсичных элементов вдоль пищевых цепей;
- анализ сельскохозяйственных зерновых культур;
- анализ волос больных.

**7. Геология и геохимия.** Станция рентгено-флуоресцентного анализа широко используется для решения многих фундаментальных и прикладных проблем геологии и геохимии:

– анализ донных осадков и образцов донного бурения озера Байкал с целью реконструкции вариаций земного палеоклимата и геохимической истории Земли за последние 100000 лет;

– анализ горных пород для поисков месторождений платины;

– комплексный анализ лунных образцов с использованием рентгено-флуоресцентного анализа на пучках СИ в комбинации с инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИННА) для геохимической характеристики восточной окраины Луны;

– анализ и сканирующий микроанализ глубоководных железо-марганцевых конкреций Тихого океана и статистический анализ слоевой структуры конкреций.

**8. Рентгеновская литография и LIGA-технология.** В последнее время исследовательская активность в Сибирском центре СИ в области рентгенолитографии характеризуется переходом к разработке микроструктур с большим аспектным соотношением структур с микронными и субмикронными деталями для различных целей.

Основные усилия на этом пути направлены на разработку регулярных микропорных мембран с различными размерами пор и с высокой прозрачностью. Были изготовлены прототипы мембран из лавсановой пленки толщиной 3–10 мкм, имеющие поры диаметром 0.3–0.6 мкм, регулярно разнесенные с шагом 1 мкм. Рабочая площадь изготовленных мембран 0.5–2.5 см<sup>2</sup>, их прозрачность достигала 30%. В отличие от традиционных мембран геометрическая прозрачность регулярных мембран может достигать 50% без ухудшения свойств селективной фильтрации. Высокая прозрачность и однородность пор регулярных мембран делают их привлекательными для многочисленных приложений в медицине, биотехнологии, экологическом мониторинге, в физических исследованиях и т.п.

Другое оригинальное направление – разработка микрооптических элементов с качественно новыми свойствами. Предполагается использовать рентгеновскую литографию для создания глубоких дифрагирующих профилей как на плоских, так и на изогнутых поверхностях линз. В связи с этим было изготовлено и исследовано несколько гибридных и собственно дифракционных микрооптических элементов. Среди них гибридные интерокулярные линзы (искусственный глаз) с мультифокальными свойствами, плоские дифракционные линзы, дифракционные решетки и зеркала с профилем глубиной до 10 мкм и ахроматическими возможностями.

Получены положительные результаты в исследовании возможности улучшения пространственного разрешения люминофорных и запоминающих экранов методом структуризации. Изготовлены первые образцы из регулярных столбиков металлических магниторезистивных Ni/Cu-сверхрешеток, нанесенных на медные или полупроводниковые кристаллические подложки. Высота столбиков достигала нескольких микрон при диаметре 0.3–0.5 мкм.

Начаты работы по созданию специализированной LIGA-станции на накопителе ВЭПП-3. В эту станцию СИ будет поступать из 11-полусюжного вигглера, который недавно был установлен на накопителе. Конструкция вигглера позволяет производить регулировку спектральных характеристик пучков в диапазоне 1–10 Å изменением магнитного поля, а также обеспечивает равномерное экспонирование в поле 72 × 20 мм с неоднородностью не выше 5% и высокую интенсивность СИ.

## **Разработка аппаратуры для исследований с использованием СИ**

### **Детекторы**

1. *Однокоординатные детекторы семейства ОД.* Новое поколение однокоординатных детекторов представлено сейчас моделями ОД-3.1 и ОД-3.2 (табл. 3). Обе модели являются безпаралаксными, многопроволочными, пропорциональными газовыми детекторами. Главное отличие этих моделей от моделей предыдущей серии (ОД-2) заключается в геометрической конфигурации проволочек и катодных плос-

Параметры рентгеновских детекторов в Сибирском центре СИ

Название	Рабочее поле, мм	Фокусное расстояние, мм	Размер канала, мм	Разрешение, мм	Количество каналов	Длина поглощения, мм	Рабочие энергии, кэВ	Минимальная экспозиция, мкс	Скорость регистрации, МГц
OD-3.1	200 × 10	350	0.07	0.18	3328	50	5–20	1	10
OD-3.2	200 × 25	1500	0.07	0.15	3328	50	5–20	1	10
DED-5	384 × 384	–	1.5 × 1.5	1.5 × 1.5	65 536	10	5–20	100	5
MSGC-100	10 × 20	–	0.2	0.2	100	5	5–20	100	100
MSGC-500 <sup>1</sup>	100 × 200	500	0.2	0.2	500	50	5–70	1	1000
ID-160-L(H) <sup>1</sup>	2760	1350	1.2	1.2; 0.12 <sup>2</sup>	6600	50	5–30; (30–70)	1	3300

Примечание: 1 – разрабатывается, 2 – в режиме сканирования.

костей. В последних – плоскость анодных проволочек и катодные полосы параллельны входным пучкам. Такой подход дает следующие преимущества:

- безпаралаксная схема может быть просто реализована для любого фокусного расстояния;
- эффективность регистрации может быть улучшена без потери пространственного разрешения.

Фокусное расстояние в OD-3.1 составляет 350 мм, что обеспечивает безпаралаксную регистрацию в пределах 30° дуги. Минимальное время съемки одного кадра 1 мксек. Модель предназначена для проведения экспериментов по порошковой дифракции и установлена на канале 5-б на накопителе ВЭПП-3. Модель OD-3.2 имеет аналогичную конструкцию, за исключением того, что фокусное расстояние составляет 1500 мм, соответственно дуга регистрации покрывает 9°. Этот детектор установлен на канале 15 А накопителя Photon Factory (КЕК, Япония) для экспериментов по малоугловому рассеянию.

2. *Двухкоординатные детекторы семейства ДЕД.* Новый детектор в данной серии – ДЕД-5. Эта модель имеет двухкоординатную многопроволочную камеру с размерами 384 × 384 мм. Поглощение квантов приводит к возникновению лавины возле ближайшей анодной проволочки. Информация о месте поглощения считывается с двух катодных плоскостей с взаимно перпендикулярными проволочками. Каждая проволочка подключена к специальному усилителю-формирователю. Точные координаты вычисляются специализированным быстрым процессором.

Детектор имеет два рабочих режима: инкрементный и покадровый. В режиме покадровой съемки данные о каждом событии последовательно записываются в память. Помимо координат регистрируются также время события и восстановленная энергия кванта. Емкость буфера памяти в этом режиме достаточна для регистрации 8 миллионов событий. Время регистрации одного кадра ограничено 100 мксек. Параметры детектора приведены в табл. 3.

3. *Микростриповые детекторы.* Прототип микрострипового детектора (MSGC-100, табл. 3) был установлен и испытан на канале СИ 7-а накопителя ВЭПП-3. Пространственное разрешение существенно зависит от давления газа в дрейфовой камере. При давлении 5 бар было достигнуто пространственное разрешение 200 мкм. Энергетическое разрешение соответствовало 8.7%. Скорость регистрации в процессе измерений не ниже 700 событий на каждую полосу. Это позволяет исследовать динамические процессы в порошковой дифрактометрии с хорошим временным разрешением.

Дополнительные усовершенствования позволяют вывести данный тип детекторов на новый уровень. Новый проект (MSGC-500) сейчас в стадии разработки. Эта модель будет иметь треугольную геометрию полосок, которые будут параллельны



регистрируемым лучам. Несколько секций по 500 полосок можно объединить в единую систему. Накопленный опыт позволяет надеяться на скорость счета до 1 МГц на каждую полоску.

4. *Запоминающие экраны (Image Plates)*. Прототип сканирующего устройства для фотостимулированного считывания рентгеновских изображений был изготовлен и испытан в Сибирском центре СИ. Размер луча лазера 25 мкм, шаг сканирования 0.5 и 5 мкм по обеим координатам, поле сканирования 240 × 150 мм.

Недавно получены предварительные результаты по улучшению пространственного разрешения люминофорных и запоминающих экранов. Такое улучшение оказалось возможным при микроструктуризации поверхности экранов массивом регулярных глубоких (60–120 мкм) пор заполненных люминофором. Поры с квадратным сечением 25 × 25 мкм покрывают экран с шагом 30 мкм. Внутренние стенки отверстий покрыты слоем меди для оптической изоляции отдельных ячеек. Другим подходом является установка пространственно-углового коллимационного оптического микрофильтра между обычным люминофором и фотопленкой при регистрации рентгеновской картины. Полученные результаты во всех случаях демонстрируют, что разрешение 30 мкм (размер ячейки) легко обеспечивается для рентгеновского изображения с энергией квантов 30 кэВ. Это позволяет надеяться, что новые типы рентгеновских экранов могут быть разработаны таким способом.

5. *Рентгеновская оптика*. Важным направлением в развитии рентгеновской оптики является создание дисперсионных элементов с большой светосилой и высоким спектральным разрешением. Многослойные дифракционные решетки (МДР) являются одними из наиболее перспективных элементов как для мягкого, так и для жесткого рентгеновского диапазона.

В области мягкого рентгеновского (МР) диапазона МДР позволяют значительно улучшить оптические и спектральные характеристики существующих схем, основанных на использовании решеток скользящего падения, или органических кристаллов, обладающих низкой эффективностью. В перспективе МДР позволят использовать преимущества схем нормального падения в ультрамягком рентгеновском диапазоне. Данные схемы позволят получать анастигматическое изображение с высоким спектральным разрешением. Кроме того МДР позволят расширить рабочий диапазон до 2 кэВ, тем самым перекрыв "трудный" для кристаллов участок МР-спектра.

В области жесткого рентгеновского диапазона МДР являются заманчивой альтернативой монополю "монокроматической" оптики кристаллов, использующих очень узкую часть спектра СИ. В отличие от кристаллов МДР являются полихроматическими элементами. Данное преимущество позволяет одновременно использовать широкий спектр СИ и реализовать новые рентгенооптические схемы, расширяющие возможности рентгеновской спектроскопии (Flash-XAFS, неупругое рентгеновское рассеяние и т.п.).

Объединенная исследовательская группа четырех институтов СО РАН (Институт ядерной физики, Институт катализа, Институт автоматики и электрометрии, Институт химии твердого тела) работает над созданием и исследованием оптики МДР. Работа ведется в следующих направлениях:

- дальнейшее развитие технологии создания многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ);
- создание МДР больших размеров с субмикронными периодами;
- теоретические исследования и компьютерное моделирование свойств МДР;
- экспериментальные исследования рентгенооптических свойств МРЗ и МДР;
- создание спектрометров ультрамягкого и МР-диапазонов на базе МРЗ и МДР.\*

Разработана технология создания многослойных решеток на основе голографической литографии и последующего ионно-лучевого травления МРЗ. Данная технология позволяет получать МДР с периодами от 0.27–2 мкм и диаметром рабочей области до 50 мм. Предложен новый метод ("метод собственных векторов") для численного расчета дифракционных характеристик МДР. Данный метод позволяет

значительно расширить возможности уже существующих (дифференциального и модального) методов. Проведены исследования оптических свойств изготовленных МДР в мягком и жестком рентгеновских диапазонах. Получены пиковые коэффициенты отражения в (-1.1)-порядке дифракции, равные 8% (8 кэВ) и 4% (275 эВ) и соответствующие ~ 70% от теоретически рассчитанных.

В области жесткого рентгеновского диапазона продемонстрировано явление концентрации дифрагированного излучения в один из первых порядков отражения МДР с практически полным подавлением остальных порядков при надлежащей настройке угла падения. Это поведение хорошо описывается в рамках дифракции на двумерном кристалле. Измеренное отношение интенсивностей (-1.1)-порядка к (0.1) равно 1% и является подтверждением хорошего качества полученных МДР.

### Разработка специализированных источников СИ

1. *Статус накопителя* Сибирь-2. В 1996 г. объединенная группа Сибирского центра СИ и Института атомной энергии им. И.В. Курчатова (Москва) достигли проектных параметров работы накопителя Сибирь-2 (табл. 4). Процесс ускорения (с 450 МэВ до 2.5 ГэВ) был окончательно отлажен в июле 1996 г. Процесс ускорения занимает ~6 мин, время жизни пучка при токе 5 мА на энергии 2.5 ГэВ составляло 1 ч. Оптимальная величина максимально накопленного тока, ограниченная в настоящий момент рассеянием на остаточном газе при существующем уровне вакуума, составляет 25–28 мА в одном сгустке.

Линак инжектирует электроны с энергией 75 МэВ в накопитель Сибирь-1 с частотой 1 Гц, импульс тока 65 мА с энергетическим разбросом 1% и длительностью 18 нсек. Эммитанс электронного пучка 0.03 мрад · см. Ток разового захвата при инжекции в Сибирь-1 достигает 30 мА. Сибирь-1 является бустерным накопителем с энергией 450 МэВ. Ток пучка на выходе из Сибири-1 составляет 100–200 мА, а продольный размер пучка  $\sigma_s = 30$  см. Перепуски в Сибирь-2 производятся примерно каждые 30 с. Продолжаются работы по увеличению энергии пучка на выходе из линака до 90 мА, при этом ожидается, что ток одиночного захвата в Сибирь-1 увеличится до 90–100 мА.

2. *Разработка и производство вигглеров и ондуляторов.* В Сибирском центре СИ разработано и изготовлено большое количество вигглеров и ондуляторов для генерации СИ на базе сверхпроводящих магнитов (табл. 5), постоянных магнитов (табл. 6) и обычных электромагнитов (табл. 7). Последние наиболее интересные разработки описаны ниже.

Таблица 4

Основные параметры накопителя Сибирь-2

Энергия	$E$	2.5 ГэВ
Периметр	$C$	124.13 м
Количество суперпериодов	$N$	6
Бетатронные числа	$\nu_x, \nu_y$	7.77; 6.70
Горизонтальный эмитанс	$\epsilon$	$9.0 \cdot 10^{-8}$ м рад
Ахроматизм	$\xi_x, \xi_y$	16.7, -12.9
Коэффициент уплотнения орбиты	$\alpha$	0.0104
Магнитное поле в поворотном магните ( $E = 2.5$ ГэВ)		1.7 Т
Градиент поля в квадрупольных линзах ( $E = 2.5$ ГэВ)		до 35 Т/м
Время радиационного затухания	$\tau_x, \tau_y, \tau_s$	2.92, 3.04, 1.55 мс
Кратность ВЧ	$q$	75
Частота ВЧ	$F$	181.14 МГц
Максимальный ток в многосгустовом режиме	$I$	300 мА
Время жизни	$\tau$	5 ч

## Сверхпроводящие источники СИ в Сибирском центре СИ

	Год	Энергия, ГэВ	Максимальное магнитное поле, Т	Период, см	Количество периодов	Полная длина, см	Зазор, см	Вертикальная апертура, см
Вигглер ВЭПП-3	1979	2.1	3.4	9	20	90	1.1	0.8
Спиральный ондулятор ВЭПП-2М	1984	0.65	0.47	2.4	16	25	1.8	1.3
Вигглер ВЭПП-2М	1984	0.65	8	24	5	60	2.65	1.5
Вигглер для "Сибирь-1"	1985	0.45	5.8		3	35	3.2	2.2
Вигглер PLS (Поханг, Корея)	1994	2	7.5		3	90	4.8	2.4
Вигглер SAMD (США)	1997	1.5	7.4		3	90	5.1	3.2
Вигглер Spring-8 (Япония)	1998	8	10		3	100	4	2

Таблица 6

## Электромагнитные источники СИ

	Год	Энергия, ГэВ	Магнитное поле, Т	Период, см	Количество периодов	Полная длина, см	Зазор, см	Критическая длина волны, Å
Спиральный ондулятор ВЭПП-2М	1980	0.7	0.21	2.5	10	25	1.8	100
Вигглер ВЭПП-4М	1985	5.5	1.6	22	5	110	2.2	0.4
Вигглер ВЭПП-3	1986	2	2.2	15 и 30	3	70	3	2.1
Ондулятор ОК, ВЭПП-3	1987	0.34	0.56	10	68	680	2.2	2400-7200
Ондулятор ТНК(2)	1992	1.6	0.65	11	12	130	3.2	100-1500
Вигглер ТНК(4)	1992	1.6	1	24	8	210	3.2	8-40
Эллиптический вигглер NSLS	1994	2.5	0.8	16	7	120	2.8	2.5-10
Эллиптический вигглер APS	1995	7	1.2	16	36	340	2	0.3-4
LIGA вигглер для ВЭПП-3	1996	2	1	24	5	133	3.2	4.6
Вигглер ВЭПП-4	1997	3-5.5	1.5	20	7	128	3.8	0.4-1.3
Спиральный ондулятор APS	1997	7	0.15	12.8	17	230	1.1 × 1.8	3

Таблица 7

## Устройства генерации СИ на постоянных магнитах

	Год	Магнитное поле, Т	Период, см	Количество периодов	Полная длина, см	Зазор, см
ВЭПП-3 ОК-1	1980	0-0.3	10	6	70	1.1-2
ВЭПП-3 ОК-2	1982	0.7	6.5	9	60	1.1
ВЭПП-3 ОК-3	1985	0.64	6.9	22	160	1.3
KAERI U-1	1996	0.6 ± 10%	1.25	160	200	0.5
TESLA U-1	1997	0.5	2.73	33	90	1.2

– *Сверхпроводящий вигглер с максимальным полем 7 Т для центра микроструктур университета Луизианы (США)*. Вигглер установлен на накопитель CAMD с энергией 1.5 ГэВ в конце 1997 г. Конструкция вигглера обеспечивает постоянство положения пучка в геометрическом центре вигглера независимо от величины поля. Это достигается использованием дополнительных “теплых” электромагнитов на концах вигглера. Основное предназначение вигглера – создание микроструктур средствами LIGA-технологии.

– *Сверхпроводящий многополюсный вигглер для накопителя Spring-8 (Япония) для генерации медленных позитронов*. Проектная величина магнитного поля в данном вигглере 8–10 Т. Такое поле в комбинации с высокой энергией электронов в накопителе Spring-8 делает этот вигглер уникальным источником для генерации высокоинтенсивных позитронных пучков, а также жестких пучков СИ.

– *Эллиптический многополюсный вигглер для накопителя APS Аргонской национальной лаборатории (США)*. Основная цель данного проекта – создание источника СИ с регулируемой циркулярной поляризацией. Вигглер имеет гибридную структуру, включающую систему полюсов на постоянных магнитах и систему электромагнитных полюсов. Постоянные магниты создают сильное вертикальное поле, а электромагниты – горизонтальное. Электромагниты питаются переменным током трапецеидальной формы, что позволяет изменять направление горизонтального магнитного поля и соответственно знак циркулярной поляризации излучения с частотой до 10 Гц. Летом 1996 г. вигглер и система питания были установлены на накопитель APS в Аргонской лаборатории. Система диагностики пучка накопителя не обнаружила искажение орбиты вне вигглера. Измеренные параметры излучения соответствуют проектным. Планируется использовать вигглер в экспериментах, где требуется циркулярно-поляризованное излучение с переключаемой спиральностью.

## **Лазеры на свободных электронах в Сибирском центре СИ**

### ***Создание центра фотохимических исследований***

В 1996 г. основные усилия по созданию центра фотохимических исследований были сконцентрированы на создании ВЧ-системы для микротрона-рекуператора. Проведены строительно-монтажные работы в зале ВЧ-генераторов и зале системы питания, сконструированы волноводно-фидерные тракты. Испытаны на полной мощности основные модификации ВЧ-генераторов: двухламповый модуль на 300 кВт и четырехламповый на 500 кВт.

Проект ЛСЭ переработан для обеспечения более коротковолнового ИК-излучения (до 1 мкм). Количество дорожек в микротроне-рекуператоре увеличено до восьми, энергия – соответственно до 90 МэВ. Излучение будет состоять из 30 пикосекундных импульсов с частотой повторения 2–22.5 МГц при  $\lambda = 1–10$  мкм.

### ***Компактный ЛСЭ для КАЕРИ***

В соответствии с контрактом с Корейским институтом атомной энергии (KAERI) в Сибирском центре СИ разработано и изготовлено оборудование для компактного ЛСЭ. Источником электронного пучка служит микротрон с энергией 8 МэВ, средним током до 75 мА, длительностью импульса 6 мкс, частотой повторения 10 Гц. Специальный гибридный ондулятор создает поле до 0.48 Т в зазоре 5 мм и периодом 12.5 мм на длине 2 м. Ондулятор позволяет получать излучение в дальнем ИК-диапазоне (25–35 мкм). Ожидаемая мощность излучения до 1 Вт. Специальный электронно-оптический канал из четырех поворотных магнитов и шести квадрупольных линз служит для оптимизации параметров пучка из микротрона. ЛСЭ на базе микротрона весьма компактен (3 × 5 м) и прост в эксплуатации.

### ***Эксперименты на оптическом клистроне накопителя Университета Дюк (США)***

В рамках сотрудничества Сибирский центр СИ поставил в Университет Дюк оптический клистрон, используемый ранее для ЛСЭ-экспериментов на байпасе накопи-

теля ВЭПП-3. Клистрон установлен на специализированный накопитель университета. Параметры накопителя и оптического клистрона позволяют получать генерацию в области 0.5–5 мкм.

В университет также был передан комплект регистрирующей аппаратуры, включающий диссектор с временным разрешением до 10 пс. В ноябре 1996 г. на оптическом клистроне получена генерация в синей области. В результате экспериментов по обратному комптоновскому рассеянию накопленного в оптическом резонаторе света на электронном пучке, получены гамма-кванты 12.6 МэВ.

### ***Эксперименты с одним электроном, циркулирующим в накопителе ВЭПП-3***

Исследования характеристик одиночного электрона в накопителе, как и других простых квантовых объектов в макроскопических ловушках, представляет фундаментальный интерес. В Сибирском центре СИ несколько лет ведутся эксперименты по изучению длины локализации одиночного электрона, циркулирующего в накопителе ВЭПП-3.

Один из подходов заключался в изучении временного распределения интервалов между фотоотсчетами, индуцированными ондуляторным излучением одного электрона. Измерение этого распределения осуществлялось на основе классического интерферометра Брауна–Твисса. Другой подход – высокоточная регистрация отдельных квантов СИ одиночного электрона и восстановление его продольной координаты в момент излучения. Регистрация производилась высокочувствительными фотоумножителями с достаточными временными характеристиками.

Интерпретация результатов, как на основе классической модели пучка, так и в соответствии с квантовой теорией электрона в потенциале продольного движения, позволила выяснить степень проявления квантовых свойств и продольную динамику одиночного электрона в накопителе.

Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН,  
г. Новосибирск

Поступила в редакцию  
28.01.1998 г.  
Принята в печать  
02.02.1998 г.

**VINOKUROV N.A., ZOLOTAREV K.V., KORCHUGANOV V.N., KULIPANOV G.N.,  
MESENTSEV N.A., ORESHKOV A.D., PANCHENKO V.E., PINDYURIN V.F., SKRINSKII A.N.,  
TOLOCHKO B.P., CHERNOV V.A., SHEROMOV M.A.**

### **RESEARCH PROGRAMME OF SIBIRIAN SYNCHROTRON RADIATION CENTRE**

The general programme of research with using synchrotron radiation (SR) in spectroscopy, metrology, project of "Free electron lasers" (FEL) and etc, carried out in Sibirian centre of SR and in collaboration with another centres was described. The technical information about SR sources, wigglers, undulators and FEL designed, made and exploited in Budker nuclear physics institute (Novosibirsk) was represented.