

**III Научный семинар
памяти
В.П.Саранцева**

Дубна, 22–23 сентября 1999 г.

Труды семинара

**III Scientific Seminar
in Memory
of V.P.Sarantsev**

Dubna, 22–23 September 1999

Proceedings of the Seminar

ПРОЕКТ ДУБНЕНСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО СИНХРОТРОНА

*В.А.Архипов, В.К.Антропов, Н.И.Балалыкин,
П.Ф.Белошицкий, О.И.Бровко, А.В.Бутенко,
А.С.Водопьянов, И.Н.Иванов, В.Г.Кадышевский,
В.В.Калиниченко, Е.А.Красавин, В.В.Кобец,
И.Н.Мешков, В.Ф.Минашкин, Н.А.Морозов,
Ю.А.Поляков, Н.А.Русакович, Н.Г.Шакур,
А.О.Сидорин, А.Н.Сисамян, А.И.Сидоров,
Г.И.Сидоров, А.П.Сумбаев, В.И.Смирнов,
Е.М.Сыресин, И.В.Титкова, С.И.Тютюнников,
С.Б.Федоренко, В.А.Швец, М.В.Юрков*
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

*П.Д.Воблый, Г.Н.Кулипанов, Е.В.Левичев, Н.А.Мезенцев,
А.Н.Скринский, Е.М.Шатунов, В.А.Ушаков*
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск

*H.Boer-Rookhuizen, E.Heine, W.P.J.Heubers, A.P.Kaan,
F.V.Kroes, L.H.Kuijter, J.V.v.d.Laan, J.Langelaar,
P.W.F.Louwrier, G.Luijckx, R.Maas, G.van Middelkoop,
J.G.Noomen, J.B.Spelt*
*National Institute of Nuclear Physics and High Energy Physics,
Amsterdam, The Netherlands*

Проект "Дубненский электронный синхротрон" (ДЭЛСИ) имеет целью создание в Объединенном институте ядерных исследований источника синхротронного излучения третьего поколения. Это позволит открыть в Институте широкий спектр исследований: как фундаментальных — в области физики, химии, биологии, медицины, так и прикладных, направленных на развитие принципиально новых технологий во многих областях техники и промышленности, включая проблемы охраны окружающей среды и здоровья человека. Источник ДЭЛСИ создается на базе оборудования ускорительного комплекса, передаваемого в ОИЯИ из Национального института ядерной физики и физики высоких энергий (NIKHEF), Амстердам, Нидерланды.

Dubna Electron Synchrotron Project

V.A.Arkipov et al.

The project "Dubna Electron Synchrotron" (DELSY) is aimed to construct a synchrotron radiation source of the third generation at the Joint Institute for Nuclear Research. This will allow one to open at the Institute a broad spectrum of researches, both fundamental — in the field of physics, chemistry, biology, medicine — and applied, directed on the development of new technologies in many areas of technology and industry, including problems of environment protection and human health. The DELSY synchrotron radiation source will be constructed on the base of the accelerator facility, which is transferred to JINR from the Institute for Nuclear Physics and High Energy Physics (NIKHEF), Amsterdam, the Netherlands.

Введение

Целью проекта ДЭЛСИ является создание в Объединенном институте ядерных исследований источника синхротронного излучения (СИ). По своим параметрам ДЭЛСИ будет представлять собой *источник СИ третьего поколения*. Для института это новое перспективное направление, оно дает возможность расширения существующих в ОИЯИ исследований по физике конденсированных сред и атомной физике, биологии и медицине, химии и геологии, проблемам экологии (мониторинг окружающей среды), а также развивает новые технологии, основанные на использовании синхротронного излучения, такие как микромеханика и литография, технология материалов и металлургия. Источник создается на базе ускорительного комплекса Национального института ядерной физики и физики высоких энергий NIKHEF (Амстердам, Нидерланды) [1]. Ускорительный комплекс NIKHEF включает в себя электронный линейный ускоритель MEA (Medium Energy Accelerator) [2] на энергию электронов 700 МэВ (табл. 1) и накопительное кольцо AmPS (Amsterdam Pulse Stretcher) с максимальной энергией электронов 900 МэВ при токе накопленного пучка 250 мА [3].

На базе последнего планируется создать накопитель электронов ДЭЛСИ. При этом периметр AmPS будет уменьшен почти в полтора раза и значительно изменена его оптика (табл. 2). Это позволяет на порядок снизить эмиттанс пучка ДЭЛСИ по сравнению с пучком AmPS и, соответственно, резко увеличить яркость накопителя как источника СИ. Кроме того, предполагается заметно увеличить энергию электронов в ДЭЛСИ, доведя ее до 1,2 ГэВ. Это может быть достигнуто при незначительной модификации дипольных магнитов AmPS.

Спектр синхротронного излучения из поворотных магнитов ДЭЛСИ простирается от инфракрасного до мягкого рентгеновского излучения. Установка "мини-ондулятора" в накопительном кольце ДЭЛСИ увеличит яркость источника до $3 \cdot 10^{18}$ фотон/с/мм²/мрад²/0,1% ш. п., что на 5 порядков превышает синхротронное излучение из поворотных магнитов. Использование сверхпроводящего виглера с напряженностью магнитного поля 10 Тл обеспечит генерацию жесткого рентгеновского излучения с энергией γ -квантов 20–50 кэВ. Все это и делает ДЭЛСИ *источником синхротронного излучения третьего поколения*.

Для использования синхротронного излучения, генерируемого в поворотных магнитах, предполагается создание 10 станций, работающих в области спектра от ин-

фракрасного до мягкого рентгеновского излучения. 6–8 станций будут созданы для использования СИ из виглера и ондулятора. С их помощью планируется иметь поток СИ, близкий по яркости и спектру к излучению из поворотных магнитов в накопительных кольцах, работающих при энергии 2–3 ГэВ. Это делает проект конкурентоспособным по сравнению с источниками с более высокой энергией электронов. С другой стороны, проект значительно дополняет возможности двух других центров СИ, существующих в России, — Сибирского синхротронного радиационного центра (ИЯФ им. Г.И.Будкера, Новосибирск) [4] и "Курчатовского источника синхротронного излучения" (РНЦ "Курчатовский институт", Москва) [5] в области инфракрасного, ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения.

1. Использование синхротронного излучения ДЭЛСИ

Современные источники СИ характеризуются экстремально высокой яркостью, достижимой на пучках электронов с малым эмиттансом, и наличием в накопителе виглеров (жесткое излучение) и ондуляторов (яркость источника). В ДЭЛСИ предполагается получить электронный пучок с эмиттансом 10 нм при энергии электронов 1,2 ГэВ.

Программа исследований на ДЭЛСИ строится с учетом особенностей спектральных характеристик СИ из поворотных магнитов, ондулятора и виглера.

СИ из поворотных магнитов ДЭЛСИ обладает достаточно высокой интенсивностью как в ультрафиолетовой, так и в инфракрасной области. Многочисленные применения этого излучения могут быть реализованы в физике конденсированных сред, физике полупроводников и сверхпроводников, в биохимии и медицине, в радиометрии и в ряде других областей.

Жесткое СИ из виглера с энергией γ -квантов 0,5–50 кэВ и *ондулятора* может быть использовано в литографии с высоким разрешением, в микромеханике, для EXAFS-спектроскопии, рентгенографии, топографии, белковой дифракции и в ряде других направлений.

Ондулятор, размещенный в прямолинейной секции накопительного кольца, может быть использован как для EXAFS-спектроскопии, так и для протеиновой кристаллографии. Характерная энергия СИ из ондулятора составляет 150 эВ–3 кэВ при максимальной яркости $3 \cdot 10^{18}$ фотон/с/мм²/мрад²/0,1% ш. п.

Немаловажна временная структура СИ накопителя ДЭЛСИ. Циркулирующий пучок имеет до 223 сгустков, протяженность которых определяет длительность всплесков СИ — порядка 30 пикосекунд. Возможен односгустковый режим.

1.1. Физика конденсированных сред и ядерная физика

Для исследований в области физики конденсированных сред планируется создать 3–4 канала СИ из поворотных магнитов и использовать СИ из виглера и ондулятора.

Для исследований электронной структуры кластеров, тонких пленок планируется создание канала со спектрометром, работающим в диапазоне 3–200 эВ.

Использование линейно поляризованного СИ в диапазоне энергий 5–50 эВ позволяет изучать оптические характеристики анизотропных кристаллов с помощью монохроматора с разрешением 0,1 эВ.

Мягкое рентгеновское излучение из поворотных магнитов эффективно может быть использовано для исследования микроструктуры вещества на надмолекулярном уровне в диапазоне длин волн $\lambda \leq 100 \text{ \AA}$.

Плодотворным вариантом рентгеновской микроскопии является сканирующая микроскопия. Поток γ -квантов, ограниченный диафрагмой, падает на близко расположенный образец, и регистрируется результат взаимодействия γ -квантов с материалом образца. Существенным преимуществом сканирующей рентгеновской спектроскопии является возможность регистрации эффектов взаимодействия излучения с образцом, что позволяет получить более полную информацию об образце.

Жесткое СИ из вилгера и ондулятора может быть использовано для литографии с высоким разрешением ($\lambda \approx 8\text{--}20 \text{ \AA}$, $E = 1,5\text{--}0,6 \text{ кэВ}$). Использование техники глубокой литографии с использованием брэгговской дифрактометрии позволяет провести исследования высокотемпературной сверхпроводимости, поверхностной диффузии зерен и коррозии.

Структурные изменения в металлах при их разрушении, протекание химических реакций в твердом теле, фазовые переходы при сверхвысоком давлении могут быть исследованы на ДЭЛСИ с помощью метода рентгеновской дифракции.

СИ из вилгера и ондулятора планируется использовать также для EXAFS-спектроскопии, рентгенографии, топографии, для исследования структуры полупроводников и в ряде других направлений.

Рентгеновская микроскопия с использованием *СИ из сверхпроводящего вилгера* позволит работать в области K -краев поглощения средних и тяжелых элементов ($\lambda \approx 0,5\text{--}20 \text{ \AA}$), присутствующих в образце. В эксперименте измеряется зависимость коэффициента поглощения монохроматического рентгеновского излучения в веществе от энергии падающего излучения. Последняя выбирается такой, чтобы она превышала энергию связи электрона, находящегося на внутренней оболочке. В этом случае эффективность передачи энергии от рентгеновского кванта электрону зависит и от расположения близлежащих (на расстоянии нескольких ангстремов) соседних атомов. Варьируя энергию падающего пучка и регистрируя интенсивность падающего и прошедшего сквозь образец пучков, находят их разность — интенсивность поглощенного излучения. По ее зависимости от энергии падающего пучка можно определить положение окружающих атомов. При монохроматичности излучения $\Delta E_\gamma \approx 3\text{--}4 \text{ эВ}$ для γ -квантов с энергией $E_\gamma = 5\text{--}15 \text{ кэВ}$ удастся измерять расположение атомов с точностью порядка $0,02 \text{ \AA}$.

Одним из возможных применений *СИ из вилгера ДЭЛСИ* в ядерной физике может быть получение узконаправленных пучков мессбауэровских квантов. Схема получения таких квантов предполагает брэгговское отражение от кристалла-монокристалла, содержащего ядра мессбауэровского изотопа. Кристаллическая структура определяет направленность потока квантов, а резонансность ядерного рассеяния и использование тонкого кристалла обеспечивают преимущественное отражение полезных квантов. Узконаправленные пучки мессбауэровских квантов позволяют проводить исследования коллективных ядерных возбуждений и анализ магнитной структуры образца.

1.2. Биология и медицина

Синхротронное излучение из поворотных магнитов предполагается использовать для исследований в биологии и медицине. Применение рентгеноструктурного анализа позволяет изучить периодические надмолекулярные структуры, в частности, таких биологических объектов, как мышечные волокна. Применение СИ значительно снижает время экспозиции благодаря высокой яркости и выбору оптимальной длины волны. В результате становится возможной съемка динамики структурных перестроек живых объектов [6].

СИ из поворотных магнитов с длиной волны порядка 100 Å применяется для исследований динамики белков, спектроскопии биополимеров.

СИ со спектром, простирающимся от инфракрасного до видимого диапазона ($\lambda \approx 3 \text{ мкм} - 5000 \text{ Å}$), найдет применение в биомедицине, микрохирургии и фототерапии.

Ондулятор ДЭЛСИ может быть использован в кристаллографии белка и исследованиях структуры органических молекул.

Жесткое СИ сверхпроводящего вилгера может быть использовано для дифракционного анализа структуры белков.

На ДЭЛСИ планируется создание станции с малоугловым рассеянием (SAXS) для исследований размеров структурных единиц в биологических полимерных пленках.

Применение EXAFS-спектроскопии дает возможность исследования структуры активных центров белков.

Рентгенофлуоресцентный анализ предполагается использовать для определения элементного состава различных образцов, в том числе и биологических объектов, например, микроэлементного анализа крови. Использование СИ позволит значительно снизить время экспозиции и уменьшить радиационную нагрузку образца по сравнению с применением радиоактивных изотопов и рентгеновских трубок, а при использовании ондуляторного излучения — избежать дополнительной монохроматизации. Возбуждение флуоресценции линейно поляризованным СИ резко уменьшает фон, определяемый упругим и комптоновским рассеянием. Развитие метода рентгенофлуоресцентного элементного анализа на СИ показало целый ряд преимуществ: высокую чувствительность, малый объем и вес изучаемого объекта (0,1–0,3 мкг), панорамность измерения, неразрушающую процедуру измерения и малую радиационную нагрузку, возможность измерения поверхностного и объемного распределения элементов, экспрессность получения результатов и возможность организации массового автоматизированного элементного анализа в прикладных исследованиях в медицине.

Применение интенсивного и монохроматического СИ из вилгера позволяет выйти в медицинской и биологической рентгенокопии на существенно новый уровень — резко поднять чувствительность благодаря использованию разностного метода при регистрации рентгеновских снимков. В исследуемый объект вводится в очень малой концентрации вещество, повышающее контрастность, например раствор соли йода ($\lambda \approx 0,3 \text{ Å}$), делаются два снимка в монохроматическом рентгеновском излучении с разными энергиями — в одном случае выше, а в другом — ниже энергии ионизации *K*-оболочки атомов этого вещества. В первом случае йод сильно поглощает излучение, во втором — слабо. Вычитая интенсивности сигналов

обоих снимков, получают контрастную фотографию объекта. Метод представляет большой интерес для рентгеноскопии кровеносных сосудов.

1.3. Новые технологии и техника

Жесткое СИ с энергией γ -квантов 0,5–50 кэВ из *виглера* и *ондулятора* может быть использовано в микромеханике. Типичная длина волны СИ, требуемая в микромеханике, составляет $\lambda \approx 2 \text{ \AA}$ ($E \approx 6 \text{ кэВ}$).

Одним из ярких примеров использования СИ в промышленности является рентгеновская литография — нанесение на поверхность кристаллов проводящих покрытий заданной конфигурации, что позволяет создавать различные сложные схемы микроэлектроники. В обычной технологии такого производства исходная структура состоит из трех слоев — кремния, проводника и фоторезиста. После засвечивания через маску-экран с отверстиями данной формы фоторезист в местах засветки приобретает устойчивость к кислоте и при последующем травлении предохраняет проводник от разрушения. Так на поверхности кремния возникает схема электрических соединений. Минимальные размеры ее элементов ограничены дифракцией излучения, экспонирующего фоторезист на отверстиях маски, что составляет несколько длин волн. Для ультрафиолетового излучения лазера это размер 1–2 микрона, для рентгеновского синхротронного излучения — на 1–2 порядка меньше. Это дает возможность резко увеличить быстродействие вычислительной техники, эффективность электронных систем регистрации и обработки различных сигналов.

Применение рентгеновской литографии ($\lambda \approx 8\text{--}20 \text{ \AA}$, $E \approx 1,5\text{--}0,6 \text{ кэВ}$) позволяет создавать микрофильтры с диаметром отверстий 0,2–0,4 мкм в лавсановых пленках толщиной 2–10 мкм. Фильтры, сделанные по этой технологии, обладают совершенно новыми качествами по сравнению с фильтрами, приготавливаемыми другими методами: они обладают высокой прозрачностью (50%) и высокой однородностью. Использование мембран находит широкое применение в микробиологии, медицине, экологии. Мембраны используют для стерилизации и хранения продуктов питания, поскольку они препятствуют прохождению микрочастиц и бактерий.

Литография широко используется также для производства дифракционных линз для приборов, работающих в видимом свете.

Качественно новые перспективы открываются с появлением яркого рентгеновского излучения из ондулятора перед рентгеновской микроголографией. Важным достоинством голографии является высокая контрастность голограммы даже для очень слабо поглощающих и слабо фазосдвигающих образцов.

Методы рентгеноструктурного анализа широко применяются для контроля состава веществ, например, в металлофизике и в металлургии. Использование интенсивных источников СИ резко сокращает время экспозиции, а регистрация при помощи координатных детекторов существенно облегчает оцифровку результатов и расшифровку рентгенограмм.

Рентгеноскопия широко применяется в технике для выявления скрытых дефектов конструкций, например, внутренних трещин, раковин в массивных изделиях и полимеров, металлов и других материалов.

Для целого класса задач в физике, в космических исследованиях требуется абсолютная калибровка детекторов электромагнитного излучения. СИ с точно определенными параметрами представляет для этих целей качественно новые возможности.

1.4. Перспективы развития ДЭЛСИ

Проект ДЭЛСИ предусматривает в перспективе развитие ускорительного комплекса. Одно из возможных направлений связано с использованием электронного линака МЕА для генерации низкоэнергичных позитронов, используемых в многочисленных приложениях в таких областях, как физика конденсированных сред, атомная физика и физика поверхности [7, 8]. Такого рода исследования ведутся во многих лабораториях мира, и развитие активности в ОИЯИ на этом направлении существенно расширит и дополнит экспериментальные исследования по физике конденсированных сред, выполняемые на импульсном нейтронном реакторе ИБР-2.

Другим применением электронного пучка МЕА может быть лазер на свободных электронах. Конструкция линейного ускорителя предусматривает отвод пучка на энергии 140 МэВ. Выведенный при этой энергии пучок может быть использован в лазере на свободных электронах для генерации инфракрасного излучения. Работы по созданию лазера на свободных электронах в мягкой рентгеновской области типа RAFEL для DESY ведутся в настоящее время в рамках коллаборации ОИЯИ и DESY [9].

Электронный пучок, циркулирующий в ДЭЛСИ, может быть использован для генерации γ -квантов жесткого рентгеновского излучения с энергией порядка 1 МэВ, получаемых при обратном комптоновском рассеянии [10]. Такой генератор остро-направленного рентгеновского излучения представляет интерес в ядерной физике.

2. Структура и основные параметры ДЭЛСИ

2.1. Инжектор электронов

В комплексе ДЭЛСИ электронный пучок формируется и ускоряется до энергии 800 МэВ в линейном ускорителе МЕА (табл. 1).

Ускоряющая система линака состоит из 14 ускоряющих станций, включающих СВЧ-генераторы, фидеры и ускоряющие секции. Структурно линейный ускоритель состоит из инжектора, группирователя, чоппера, предварительного группирователя энергии (пребанчера), банчера, 23 ускорительных секций и компрессора спектра энергии. Ускорительные секции содержат 11 однородных $2\pi/3$ -сегментов увеличенного импеданса. На участке инжектора и на начальном ускорительном участке при сравнительно малых энергиях электронов используются фокусировка и транспортировка пучка в продольном магнитном поле соленоидов. Далее фокусировка осуществляется дублетами квадрупольных линз, установленными на участках дрейфа между промежуточными станциями. Для увеличения энергии электронов с 700 до 800 МэВ планируется установить еще две длинные (запасные) ускоряющие секции. В качестве усилителей СВЧ-мощности используются импульсные клистроны, один клистрон VA938D фирмы "Вариан", питающий ускорительные секции

A0 и A01, чоппер, пребанчер, банчер и клистроны TH2129 фирмы "Томсон" для всех остальных секций.

Таблица 1. Параметры электронного линака МЕА

Параметр	Рутинный режим	Форсированный режим
Общее описание		
Длина, м		200
Энергия электронная, ГэВ	0,7	0,8
Частота повторения, Гц	10	250
Ток пучка	пиковый, мА средний, мкА	20-40 60 50
Средняя мощность пучка, кВт	0,56	34
Нормализованный эмиттанс (1σ), $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	25	25
Длительность импульса, мкс	2	3,5
ВЧ-параметры ускоряющей системы		
ВЧ-частота, ГГц		2,856
Градиент ускорения, МэВ/м		5-7
Длительность импульса, мкс		0,1-3,5
Мощность резонатора, МВт	10	20
Число ускорительных станций		14 (A00-A13)
Число клистронов	1 (VA938D)+12 (TH2129)	
Число модуляторов		12 (13)
Длина ускорительных секций, м		$3 \times 3,6 + 20 \times 7,35$
Компрессор спектра энергии		
Разброс по энергии $\Delta E/E$, %	до компрессора после компрессора	1,0 0,1

2.2. Накопитель ДЭЛСИ

Магнитная структура накопителя ДЭЛСИ разработана с учетом следующих требований: использование магнитных элементов накопительного кольца AmPS; достижение минимально возможного эмиттанса при динамической апертуре, обеспечивающей эффективную инжекцию и достаточно высокое время жизни накопленных электронов; обеспечение максимальной яркости из виглера и ондулятора.

Магнитная структура накопительного кольца AmPS не удовлетворяет этим требованиям [11]. Прежде всего, эмиттанс электронного пучка составляет 160 нм, что на порядок выше, чем в современных накопителях СИ. Затем относительно невысокая энергия электронов — 0,9 ГэВ. Модернизация магнитной структуры и элементов AmPS направлена на увеличение максимальной энергии электронов и уменьшение эмиттанса пучка. Решение этих проблем обсуждается ниже.

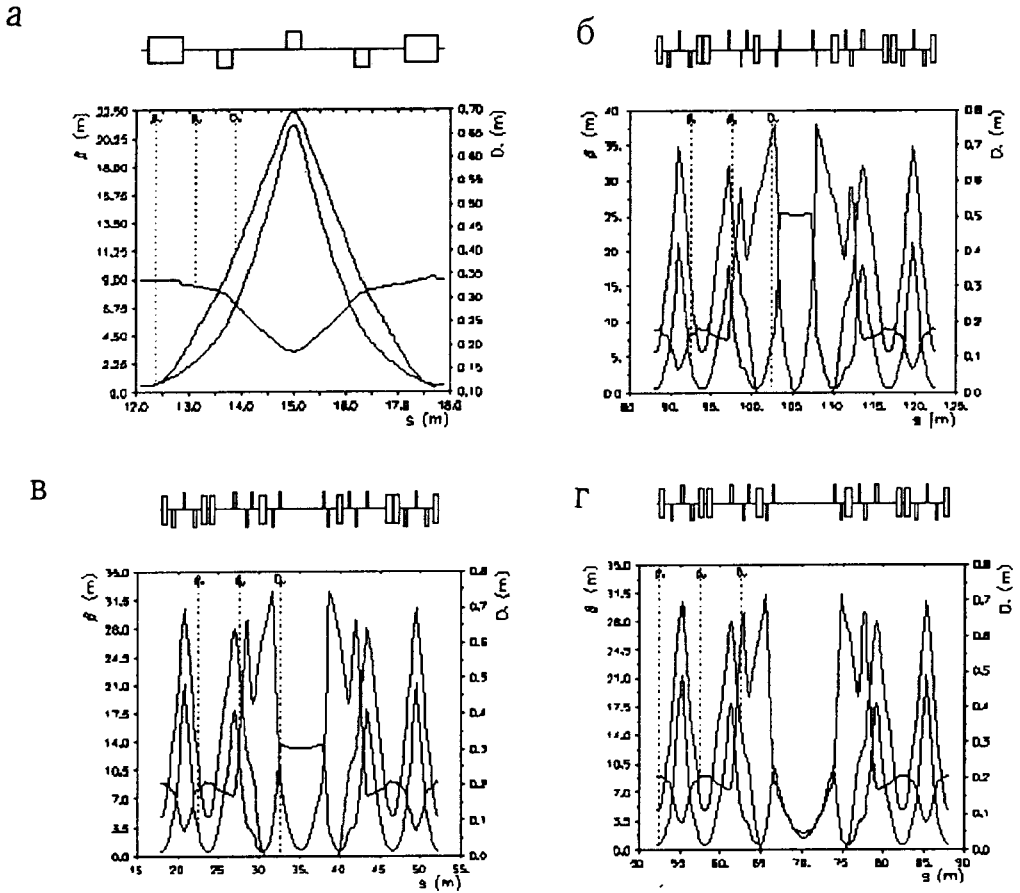


Рис. 1. Структура и структурные функции кольца ДЭЛСИ: а) периодическая ячейка, б) согласующие ячейки и прямолинейная секция для инъекции, в) согласующие ячейки и прямолинейная секция для ондулятора, г) согласующие ячейки и прямолинейная секция для вигглера

Кольцо ДЭЛСИ состоит из четырех суперпериодов. Каждый суперпериод включает первую согласующую ячейку, два элемента периодичности и вторую согласующую ячейку. Элемент периодичности (рис. 1) состоит из двух дипольных магнитов и трех квадрупольных линз. В ее состав также входят две секступольные линзы, три комбинированных горизонтальных и вертикальных корректора орбиты, три пикап-электрода, три магниторазрядных насоса производительностью 60 л/мин, один экран-люминофор и видеомонитор для регистрации параметров пучка на первом обороте, чистящие электроды для удаления ионов, образующихся при ионизации атомов остаточного газа пучком.

Набеги фаз бетатронных колебаний на элементе периодичности равны $\mu_x = 0,43 \cdot 2\pi$, $\mu_y = 0,15 \cdot 2\pi$. Выбор набега фазы по горизонтали определяется из условия минимизации эмиттанса. Меньший эмиттанс может быть получен, если сделать дисперсию ненулевой в прямолинейных промежутках (виглер и ондулятор выключены, излучение только из поворотных магнитов). В этом случае эмиттанс может быть уменьшен до 5–6 нм. Согласующий элемент содержит два дипольных магнита и обеспечивает нулевую дисперсию в прямолинейной секции.

Частоты бетатронных колебаний в настоящее время выбраны равными $Q_x = 9,58$, $Q_y = 3,56$. Максимальный градиент в квадрупольных линзах предполагается увеличить с 11 до 20 Тл/м. Системы охлаждения и питания квадрупольных линз позволяют это сделать без дополнительной модернизации.

Максимальная проектная энергия электронов в ДЭЛСИ составляет 1,2 ГэВ, тогда как максимальная энергия в AmPS была 0,9 ГэВ. Чтобы увеличить энергию электронов (поднять магнитную жесткость с 3 до 4 Тл·м), требуется некоторая модернизация дипольных магнитов.

Для коррекции хроматичности используются два семейства секступольных линз. Чтобы скорректировать хроматичность кольца, силы секступолей в ДЭЛСИ должны быть увеличены с 49 до 120 Тл/м². Для этого требуется усилить охлаждение секступолей. Кроме того, количество секступолей в ДЭЛСИ должно быть увеличено как минимум до 48 по сравнению с 32 секступолями в AmPS.

Структура прямолинейных участков кольца в значительной степени определяется требованием максимальной яркости СИ из ондулятора и виглера. Длина дрейфовых промежутков прямолинейных участков равна соответственно 7,2 и 5,3 м. Один из длинных дрейфовых промежутков планируется использовать для размещения виглера и кикера, другой — для двух ВЧ-станций и второго кикера. В одном из коротких дрейфовых промежутков будет помещен ондулятор, в другом — септум. Для оптимизации СИ из виглера обе бета-функции в нем должны быть достаточно малы: $\beta_x = 1,5$ м и $\beta_y = 2$ м в центре.

Кикер имеет длину 1,6 м, расстояние между пластинами 4 см, напряженность электрического поля 20 кВ/см. Набег фаз бетатронных колебаний между двумя кикерами в горизонтальной плоскости равен $\Delta\mu_x = (2n + 1)\pi$, между кикером и септумом $\Delta\mu_x = 2n\pi + \pi/4$. Горизонтальная бета-функция в септуме равна $\beta_x = 25$ м. Угол отклонения при максимальном горизонтальном ударе кикера составляет 4,6 мрад (энергия электронов 0,8 ГэВ), что обеспечивает смещение замкнутой орбиты в области септума на 24,6 мм. Для накопителя ДЭЛСИ необходимо разработать новый септум с углом отклонения пучка на 120 мрад при энергии инжекции 0,8 ГэВ. Длина септума составит 1,2 м, толщина септумного ножа — 3 мм.

Динамическая апертура, вычисленная с использованием программы MAD [12], равна $74\sigma_x$ и $56\sigma_y$ (рис. 2). Требуемая для эффективной инжекции динамическая апертура, выраженная через размер пучка σ_x , описывается выражением

$$N_x \sigma_x^c = 5\sigma_x^c + d + 8\sigma_x^i,$$

где d — толщина ножа септума, индексы c и i относятся к циркулирующему и инжектируемому пучкам. С учетом значений эмиттансов инжектируемого (18,3 нм) и циркулирующего (4,93 нм при энергии 0,8 ГэВ) пучков, толщины ножа септума

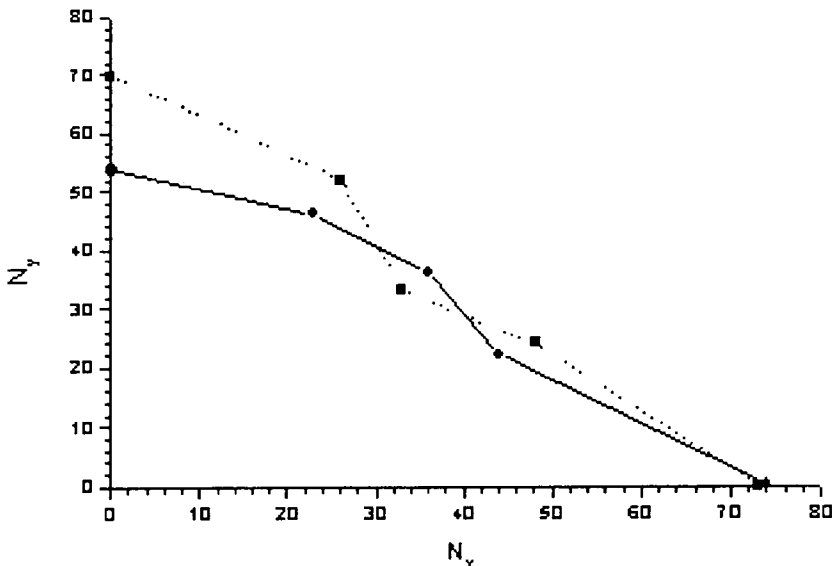


Рис. 2. Динамическая апертура, выраженная в стандартных отклонениях, для включенного (сплошная кривая) и выключенного вигглера (пунктирная кривая). Линии соответствуют минимальной амплитуде колебаний частиц, при которой движение еще устойчиво для всех начальных фаз

3 мм и величины горизонтальной бета-функции 25 м необходимо иметь $N_x > 29$. В вертикальной плоскости (вертикальный эмиттанс инжектируемого пучка равен горизонтальному) требования к динамической апертуре значительно мягче: $N_y > 13$. Если, с учетом погрешностей, динамическая апертура окажется недостаточной, то она может быть увеличена путем использования дополнительных секступолей, расположенных на участках с дисперсией, равной нулю.

Для частиц с отклонением по импульсу $|\Delta p| = 1\%$ динамическая апертура изменится незначительно, она равна $50\sigma_x$ и $48\sigma_y$.

2.3. Продольная устойчивость электронного пучка

В накопителе ДЭЛСИ предполагается иметь циркулирующий электронный пучок с током до 300 мА. Основные проблемы с формированием такого пучка связаны с его устойчивостью на энергии инжекции 0,8 ГэВ и с ускорением до максимальной энергии 1,2 ГэВ. В AmPS при энергии инжекции 0,6 ГэВ максимальный накопленный ток составлял 250 мА. Однако минимизация эмиттанса в кольце ДЭЛСИ потребовала значительного, по сравнению с AmPS, уменьшения коэффициента расширения орбиты (в 5–6 раз, табл. 2), что в конечном итоге приводит к снижению порогового тока для продольной неустойчивости.

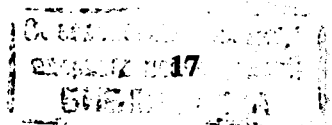


Таблица 2. Основные параметры накопительных колец AmPS и ДЭЛСИ

Электронное кольцо	AmPS	ДЭЛСИ
Энергия электронов, ГэВ	0,9	1,2
Энергия инжекции, ГэВ	0,7	0,8
Периметр, м	211,76	140,546
Радиус поворота магнитов, м	3,3	3,3
Длина прямолинейных секций, м	32	
	длинная	7,2
	короткая	5,3
Период обращения электронов, мкс	0,706	0,4685
Частоты бетатронных колебаний:	горизонтальная	8,3
	вертикальная	7,214
Коэффициент расширения орбиты	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$
Хроматичность:	горизонтальная	-15
	вертикальная	0,2
Ток инжекции, мА	10	10
Ток накопленных электронов, мА	250	300
Горизонтальный эмиттанс, нм	160	11,1
Частота ускоряющей ВЧ-системы, МГц	476	476
Номер гармоники	336	223
Частота синхротронных колебаний	0,031	0,007
Максимальное ВЧ-напряжение, кВ	350	350
Равномерная длина сгустка, мм	15	8,67
Число элементов магнитной структуры:	поворотные магниты	32
	квадрупольи	68
	секступольи	32
		≥ 48

Пороговый ток продольной неустойчивости в односгустковом режиме оценивается известным критерием Кайла-Шнелля-Буссара:

$$I_{\text{bunch}} = \frac{2\pi\alpha E_e / e\sigma_e^2}{|Z/n|},$$

где α — коэффициент расширения орбиты, σ_e — равновесный разброс электронов по энергии, E_e — энергия электронов, $|Z/n|$ — продольный импеданс пучка в накопителе. Пороговый ток для h сгустков с гауссовским распределением, циркулирующих в кольце, по порядку величины равен

$$I_{\text{long}} = h \frac{2\sqrt{\pi}\sigma_\ell}{C_e} I_{\text{bunch}} = \frac{2\pi\alpha E_e / e\sigma_e^2}{|Z/n|} \cdot \frac{2\sqrt{\pi}\sigma_\ell h}{C_e},$$

где h — номер ВЧ-гармоники, σ_ℓ — среднеквадратичная длина сгустка, C_e — периметр кольца. Для сгустка длиной σ_ℓ , меньшей радиуса вакуумной камеры b , импеданс оценивается соотношением [13]

$$\left| \frac{Z}{n} \right| = \left| \frac{Z}{n} \right|_0 \cdot \left(\frac{\sigma_\ell}{b} \right)^{1,68},$$

где $\left| \frac{Z}{n} \right|_0$ — импеданс камеры. Расчеты для гладкой вакуумной камеры радиусом $b = 3,75$ см и импедансом $\left| \frac{Z}{n} \right|_0 = 10$ Ом показывают, что пороговый ток для многоступенчатого режима при энергии инжекции 0,8 ГэВ составляет примерно 170 мА. Для увеличения тока до 300 мА необходимо снизить импеданс до $\left| \frac{Z}{n} \right|_0 = 5,7$ Ом или увеличить напряжение камеры ВЧ до 1 МВ. Предполагается также рассмотреть вариант с перестройкой оптики, что позволит увеличить α и, соответственно, пороговый ток на энергии инжекции.

3. Синхротронное излучение

3.1. Синхротронное излучение из поворотных магнитов

Параметры синхротронного излучения из поворотных магнитов ДЭЛСИ приведены в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3. Параметры СИ из поворотных магнитов ДЭЛСИ

Параметры	Энергия электронов, ГэВ		
	1,2	1	0,8
Критическая энергия СИ, кэВ	1,16	0,67	0,34
Поток СИ, фотон/с/мрад/0,1% ш.п.	$7 \cdot 10^{12}$	$4,7 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$
Яркость СИ, фотон/с/мм ² /мрад ² /0,1% ш.п.	$2 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{13}$	$3,91 \cdot 10^{13}$
Плотность мощности СИ, Вт/мрад ²	2,8	1,6	0,73
Линейная плотность мощности СИ, Вт/мрад	2,4	1,2	0,45
Мощность СИ, кВт	16,6	8	3,24

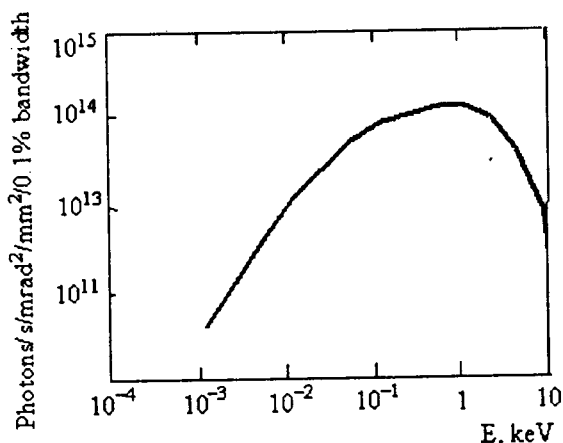


Рис. 3. Зависимость яркости синхротронного излучения от энергии фотонов: $E_e = 1,2$ ГэВ, $I = 0,3$ А

3.2. Синхротронное излучение ондулятора ДЭЛСИ

Мини-ондулятор длиной 2,5 м, со 150 периодами решетки (табл. 4), установленный в прямолинейной секции накопителя ДЭЛСИ, позволит получить яркость на пять порядков выше яркости СИ из поворотных магнитов. Использование мини-ондуляторов в настоящее время становится все более популярным, такие ондуляторы установлены, в частности, на ESRF и SPRING8. Они позволяют достичь высокой яркости при относительно короткой длине прямолинейной секции (табл. 5).

Таблица 4. Параметры мини-ондуляторов

Источник СИ	NSLS-PSGU	NSLS-IVUN	ДЭЛСИ
Период решетки, мм	16	11	15
Зазор между магнитами, мм	6	3	5
Апертура, мм	3	3	3
Магнитное поле, Тл	0,623	0,678	0,75

Таблица 5. Параметры мини-ондулятора ДЭЛСИ

Параметры	Энергия электронов, ГэВ			
	0,7	0,9	1	1,2
Энергия фотонов СИ на первой гармонике, кэВ	0,2	0,32	0,4	0,58
Поток СИ на оси ондулятора, 10^{16} фотон/с/мрад ² /0,1% ш.п.	1,2	1,7	2,2	3
Яркость СИ на оси ондулятора, 10^{18} фотон/с/мм ² /мрад ² /0,1% ш.п.	1,2	1,7	2,2	3
Плотность мощности, Вт/мрад ²	45	110	160	310
Мощность, Вт	59	97	120	173

Яркость синхротронного излучения из ондулятора достигает величины $3 \cdot 10^{18}$ фотон/с/мм²/мрад²/0,1% ш.п., и, как показывает сравнение с другими источниками СИ, ДЭЛСИ может быть отнесен к источникам СИ 3-го поколения. Энергия фотонов первой гармоники соответствует 0,58 кэВ, третьей гармоники — 1,76 кэВ. Рост эмиттанса электронного пучка приводит к значительному снижению яркости СИ (рис. 4). Величина эмиттанса, при котором яркость ограничивается дифракцией СИ, соответствует 3 нм.

3.3. Синхротронное излучение из виглера

Сверхпроводящий виглер с магнитным полем до 10 Тл генерирует поток СИ с энергией фотонов 20–50 кэВ (табл. 6, 7, рис. 5) [14].

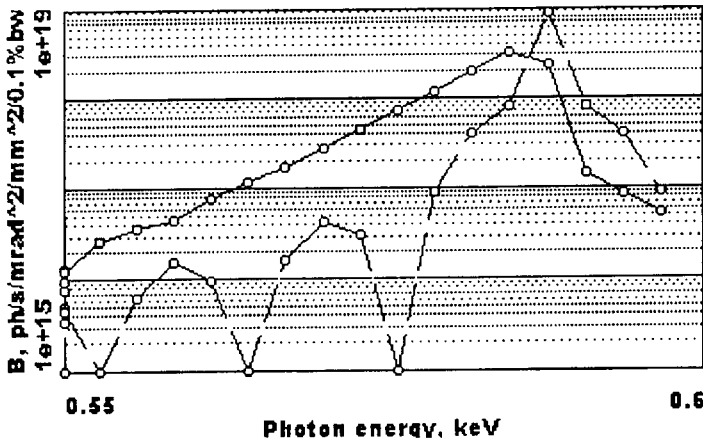


Рис. 4. Яркость СИ из ондулятора ДЭЛСИ для первой гармоники: $\epsilon_x \epsilon_y = 10/1$ нм (сплошная кривая), $\epsilon_x \epsilon_y = 0$ (пунктирная кривая), $E_e = 1,2$ ГэВ, $I = 300$ мА

Таблица 6. Параметры сверхпроводящего вигглера ДЭЛСИ

Период, см	30
Полная длина, см	100
Число периодов	1
Поле в центральном диполе, Тл	10
Поле в боковых диполях, Тл	2
Зазор поля, мм	50
Ондуляторный фактор, К	252
Угловой разброс СИ из вигглера ($2K/\gamma$), мрад	210

Таблица 7. Параметры СИ из сверхпроводящего вигглера ДЭЛСИ

Параметры	Энергия электронов, ГэВ		
	0,8	1,2	1
Критическая энергия, кэВ	3,83	8,6	6
Поток СИ, фотон/с/мрад ² /0,1% ш.п.	$9 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{13}$
Яркость СИ, фотон/с/мм ² /мрад ² /0,1% ш.п.	$3,83 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{13}$
Плотность мощности, Вт/мрад ²	36	181	87
Линейная плотность мощности, Вт/мрад	175	542	341
Мощность, кВт	3,07	6,9	4,8

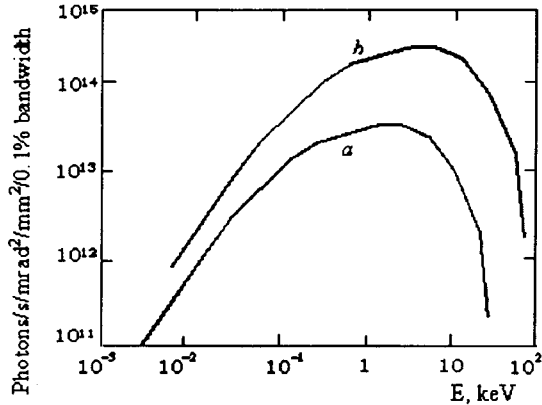


Рис. 5. Зависимость яркости СИ из виглера ДЭЛСИ от энергии фотона
 а) $E_e = 0,8$ ГэВ, $I = 0,3$ А; б) $E_e = 1,2$ ГэВ, $I = 0,3$ А

Заключение

Создание источника СИ третьего поколения в Дубне позволит значительно обогатить научную программу ОИЯИ и даст возможность расширить экспериментальные исследования в области физики конденсированных сред и атомной физики, биологии и медицине, в химии и геологии, а также развить новые технологии на базе СИ. Реализация этого проекта представляет значительный интерес для научного сообщества и промышленности стран-участниц ОИЯИ.

Литература

1. Luijckx G., Bijevelde J.H. M., Boer Rookhuizen et al. The Amsterdam Pulse Stretcher project (AmPS). – PAC, Chicago, 1989, NIKHEF/AmPS/89/03.
2. Kroes F.B. "Electron Linac MEA" Linacs. – LINAC'96 Conference, Geneva, 22–24 August 1996.
3. Maas R., Wu Y. New layout of Amsterdam Pulse Stretcher. – NIKHEF-K/APS/89/01, 1988.
4. Korchuganov V.N., Kulipanov G.N., Mezetsev N.A. et al. Synchrotron radiation and free electron laser activities in Novosibirsk. – NIM, 1995, v.A359, p.1.
5. Artemiev A.N., Dudina N.S., Moryakov V.P. Kurchatov Synchrotron Radiation Source status report on active proposal. – NIM, 1995, v.A359, p.30.

6. Вазина А.А. – Труды Всесоюзного совещ. по использованию синхротронного излучения, СИ-82. Новосибирск, 1982, с.171.
7. Frieze W.L. et al. Positron-beam-brightness enhancement: low-energy positron diffraction and other applications. – Phys. Rev. B-Solid State, 1985, v.31(9), p.5628.
8. International workshop on advanced techniques of positron beam generation and control. Japan, Wako, 1998, p.50.
9. Seeding option for the VUF free electron laser at DESY, Hamburg, Germany, 1999.
10. Кезерашвили Г.Д. Обратный комптон-эффект на электрон-позитронных пучках в накопителях (методика, эксперименты, новые возможности). – Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1994.
11. Wu Y. The optical design of AmPS. Doctor Thesis. – Amsterdam, 1991.
12. The MAD Program, Version 8.19, CERN/SL/90-13(AP) (Rev.5).
13. Wilson P.B. et al. Bunch lengthening and related effects in SPEAR II. – IEEE, VNS-24, N3, June 1977.
14. Grudiev A.V., Durba V.N., Kulipanov G.N. et al. Superconducting 7.5 tesla wiggler for PLS. – NIM, 1995, v.A359, p. 101.