

УДК 539.125, 539.171

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Г. В. Долбилов, И. Н. Иванов, А. К. Каминский,
В. А. Мельников, С. И. Тютюнников, Ю. П. Филиппов,
Г. Д. Ширков, М. В. Юрков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Лаборатория физики частиц

СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА LHC (ПРОЕКТ «LHC DAMPER»)	576
ИСТОЧНИКИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕ- ТРОВОГО ДИАПАЗОНА	579
РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ	582
ДИАГНОСТИКА КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ	586
РАЗРАБОТКА УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХ- НОЛОГИЙ	590
РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СИНХРОТРОННОМУ ИЗ- ЛУЧЕНИЮ В ЛФЧ	592
ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ИСТОЧНИКОВ МНОГОЗА- РЯДНЫХ ИОНОВ	595
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	599

УДК 539.125, 539.171

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Г. В. Долбилов, И. Н. Иванов, А. К. Каминский,
В. А. Мельников, С. И. Тютюнников, Ю. П. Филиппов,
Г. Д. Ширков, М. В. Юрков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Лаборатория физики частиц

Дан обзор основных направлений исследований по ускорительной технике в ЛФЧ ОИЯИ: системы подавления поперечных колебаний пучка ЛНС, лазеры на свободных электронах, криофизика, ускорители для радиационных технологий, синхротронное излучение, источники многозарядных ионов.

The review of the main directions of the accelerator-technique developments at LPP JINR is given: LHC damper system, free electron laser, cryophysics, accelerators for radiation technologies, synchrotron radiation, and multicharged ion sources.

1. СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА ЛНС (ПРОЕКТ «ЛНС DAMPER»)

Начиная с 1997 г. в ускорительном отделении ЛФЧ осуществляется разработка и создание системы подавления поперечных колебаний пучка для большого адронного коллайдера ЛНС, сооружаемого в CERN (проект LHC Damper). Эта работа ведется в рамках соглашения ОИЯИ–CERN по участию нашего Института в ускорительной части создания ЛНС и поддерживается Министерством науки и промышленности РФ как часть общей программы участия России в создании ускорителя нового поколения.

Основная задача этих систем изначально состояла в обеспечении поперечной устойчивости заряженных частиц, что позволяет существенно повысить интенсивность ускоряемых пучков. С возникновением первых проектов коллайдеров роль этих систем еще более возросла. Это связано с очень большим (до нескольких часов) временем жизни пучка, в течение которого необходимо поддерживать его светимость. Ко времени возникновения этой задачи в ОИЯИ уже был накоплен некоторый опыт по созданию аналогичных систем для ускорительно-накопительного комплекса в ИФВЭ [1]. Руководство CERN

заинтересовалось полученными результатами и пригласило наших специалистов в числе ведущих групп из других стран принять участие в разработке предложений по созданию системы поперечных обратных связей для ЛНС.

В процессе исследований выяснился ряд особенностей динамики пучка, потребовавших поиска принципиально новых решений. Один из возможных путей был открыт в CERN на ускорителе SPS и состоял в использовании нелинейных режимов подавления колебаний (так называемый режим «bang-bang»). В ЛФЧ ОИЯИ был предложен и совместно с CERN осуществлен эксперимент на пучке SPS, чтобы показать эффективность нелинейных методов и возможность их реализации. Результатом работы стало не только подтверждение старых результатов, но и открытие нового нелинейного метода подавления, названного «логическим» [2], что позволило использовать принципиально новую схемотехнику для создания систем поперечной обратной связи. Кроме того, несколько оригинальных технических решений показали возможность построения системы, которая могла бы плавно переходить от апробированного «классического» метода к любому виду нелинейности без потери надежности работы ускорителя [3]. Параллельно этой деятельности в ЛФЧ ОИЯИ были развернуты исследования в области сильноточной радиотехники, которые должны были показать возможные технические решения предложенной системы [4].

В соответствии с соглашением ОИЯИ–CERN коллаборация производит 20 электростатических кикеров и 40 широкополосных усилителей для системы поперечной обратной связи ЛНС. Параметры разрабатываемых устройств не имеют аналогов в мировой практике.

Для реализации мощного широкополосного усилителя было предложено два схемотехнических варианта. Первый (базовый) основан на традиционном широкополосном усилителе класса АВ. Второй (альтернативный) использует оригинальную разработку каскадной схемы с параллельным управлением. Специфика второго варианта состоит в том, что до сих пор были известны реализации этой схемы на мощности около 100 Вт, тогда как по условиям ЛНС необходимо обеспечить мощность до 16 кВт. Оба варианта были рассчитаны с использованием программного обеспечения «PSpice» (на основе специально созданных моделей реальных вакуумных ламп) и исследованы на специальном стенде при мощности до 2 кВт. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов позволило осуществить дальнейшую разработку и изготовление реального усилителя для системы подавления при полной проектной мощности.

Не меньше оригинальных конструкторских и технологических решений содержит в себе и прототип кикера. Это объясняется уникальным сочетанием разнообразных и подчас противоречивых требований к разрабатываемому устройству. В частности, это необходимость получения высокой геометрической точности расположения элементов и невозможность введения в

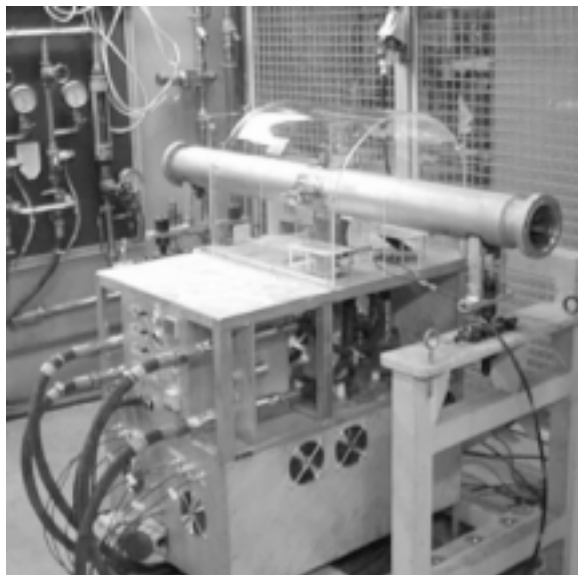


Рис. 1. Прототип системы на стенде

конструкцию механизмов ручной юстировки. Другой пример — требование высокой электрической прочности и необходимость нанесения проводящих слоев на изоляторы для борьбы с эффектом «электронного облака». С учетом сложности поставленной задачи к изготовлению отдельных элементов конструкции были привлечены ведущие научно-производственные предприятия России.

Разработанный прототип кикера представляет собой электростатический дефлектор, состоящий из двух медных пластин длиной 1500 мм, имеющих профиль симметричных 90° сегментов кольца с внутренним диаметром 52 мм. Пластины жестко связаны друг с другом посредством специальных металло-керамических колец. Эти же кольца используются для крепления пластин вакуумного танка. Предложенная механическая конструкция кикера обеспечивает автоматическое выравнивание и центрирование пластин дефлектора относительно оси камеры. Механические тесты показали достаточную надежность изделия по отношению к механическим нагрузкам.

В феврале 2000 г. были закончены наладка классических вариантов усилителей и сборка прототипа (см. рис. 1). Тестирование собранного комплекса было проведено на специальном стенде ЛФЧ совместно с коллегами из CERN. Испытания показали полную адекватность характеристик установки проект-

ным параметрам. После этого прототип установки был отправлен в CERN для повторных испытаний. Были также проведены испытания кикера на устойчивость к тепловым нагрузкам, связанным с вторичными электронами, выбиваемыми протонным пучком из остаточного газа. Абсолютная температура отклоняющих пластин кикера оказалась ниже 70°C , что не влияет на параметры системы.

Главный результат завершенных на данный момент работ состоит в том, что схемотехника усилителей и конструкция кикера в целом соответствуют требованиям проекта и могут считаться согласованными. В настоящее время документация на прототип системы проходит в CERN процедуру согласования с ответственными экспертами проекта. Завершение этого этапа будет являться стартом для начала изготовления промышленной серии оборудования.

2. ИСТОЧНИКИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

В 1983 г. профессор В. П. Саранцев инициировал начало исследовательских работ в ОИЯИ по созданию источников когерентного СВЧ-излучения — лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). В миллиметровом диапазоне длин волн такие источники получили название мазеров (МСЭ). Как одно из основных прикладных применений, рассматривалось использование МСЭ в работах по двухпучковому ускорению (ДПУ), предложенному в [5]. В ДПУ источником СВЧ-энергии для запитки ускоряющих секций пучка основного ускорителя, в которых обеспечивается высокий (более 100 МВ/м) темп ускорения, является пучок низкоэнергетического сильноточного ускорителя. Для получения высокого темпа набора энергии в основном ускорителе предполагалось заметное увеличение (до $10 \div 40\text{ ГГц}$) частоты ускоряющего поля.

В то время как эффективности традиционных источников СВЧ-мощности резко снижаются при увеличении рабочей частоты выше 10 ГГц , а для МСЭ это ограничение в указанном диапазоне отсутствует, напряжение пробоя по поверхности увеличивается с частотой. Поэтому для частотной привязки МСЭ был выбран диапазон $30 \div 40\text{ ГГц}$. Именно в этом диапазоне разрабатывается проект коллайдера CLIC (Compact Linear Collider), в котором рабочая частота равна 30 ГГц , темп ускорения 150 МВ/м . Выбор 30 ГГц близок к пределу, за которым стандартные технологии для изготовления ускоряющих структур на бегущей волне становятся практически неприменимыми.

Эффективность МСЭ весьма критична к величине энергетического разброса и эмиттанса электронных пучков и составляет единицы процентов. В диапазоне $10 \div 40\text{ ГГц}$ такие значения эффективности достигались, как правило, при условии, что из сильноточных электронных пучков использовалась

только лучшая (с наибольшей яркостью) часть, которая составляла от 25 до 10 % полного тока ускорителя.

С начала работ по генерации когерентного излучения в ОИЯИ исследования проводились по трем основным направлениям:

- экспериментальные и теоретические исследования схем МСЭ,
- создание группирователей электронного пучка и исследование его динамики,
- создание источника СВЧ-мощности для тестирования и запитки высокоградиентных ускоряющих структур в диапазоне $30 \div 40$ ГГц.

Ускорительная база ОИЯИ для проведения исследований по данной программе состояла из линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-3000. В 1995 г. в ОИЯИ начались исследования генераторной схемы МСЭ [6], в которой для получения одномодовой узкополосной генерации с высокой эффективностью в цепи обратной связи МСЭ-генератора были использованы брэгговские резонаторы. Брэгговские зеркала, образующие резонатор, представляют собой отрезки цилиндрического волновода с регулярной гофрировкой, внутренней по поверхности, и практически не препятствуют прохождению пучка по волноводу МСЭ. Начальное усиление СВЧ-сигнала в МСЭ-генераторе с брэгговским резонатором происходит на нескольких частотах, находящихся внутри полосы отражения резонатора.

При численном моделировании и в экспериментах по оптимизации МСЭ было показано, что в зависимости от его параметров в МСЭ-генераторе на конечном этапе усиления может реализоваться либо одномодовый, либо многомодовый режим генерации. Экспериментально режимы одномодовой или многомодовой генерации наблюдались по наличию или отсутствию биений на собственных модах резонатора [7]. Переход от многомодового режима к одномодовому происходил при изменении добротности резонатора от 2000 до 400, при этом эффективность генератора возрастала в 2–3 раза.

Значительный прогресс в исследованиях по увеличению эффективности МСЭ был достигнут после того, как в работах [8] было продемонстрировано, что эффективность и ширина спектра на выходе МСЭ с ведущим магнитным полем имеют сильную зависимость от направления этого поля. Экспериментально измеренное в [9] значение эффективности МСЭ-усилителя в режиме так называемого обратного ведущего магнитного поля достигало 27 % и превышало эффективность МСЭ в режиме прямого поля в 3–9 раз.

Хотя в МСЭ-генераторе с рассмотренным выше брэгговским резонатором удается обеспечить высокую эффективность и узкополосность СВЧ-излучения, проблемы фиксации и плавной подстройки частоты генерации в этой схеме практически не решаются. Выход был найден [10] при использовании в МСЭ-генераторе резонатора, состоящего из двух брэгговских зеркал (без регулярного волновода), между которыми обеспечивается скачок фазы гофрировки. В таком резонаторе удается выполнить условие, когда

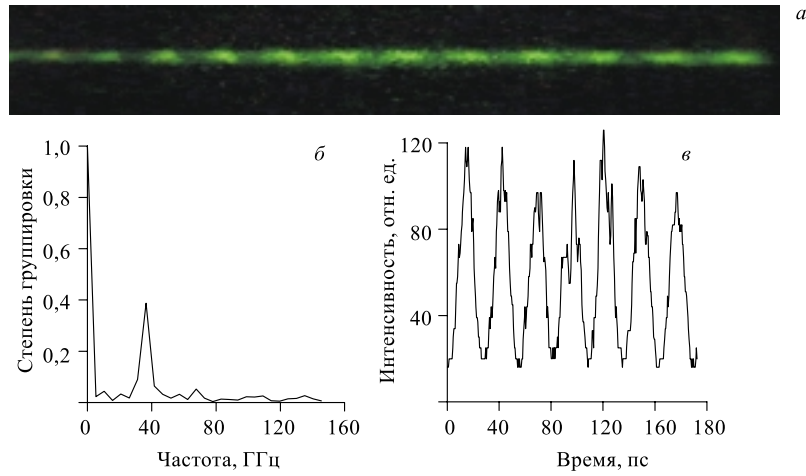


Рис. 2. а) Временной профиль сгруппированного электронного пучка, зарегистрированный фотохронографом. б, в) Соответствующий фурье-спектр и оцифрованная временная зависимость интенсивности

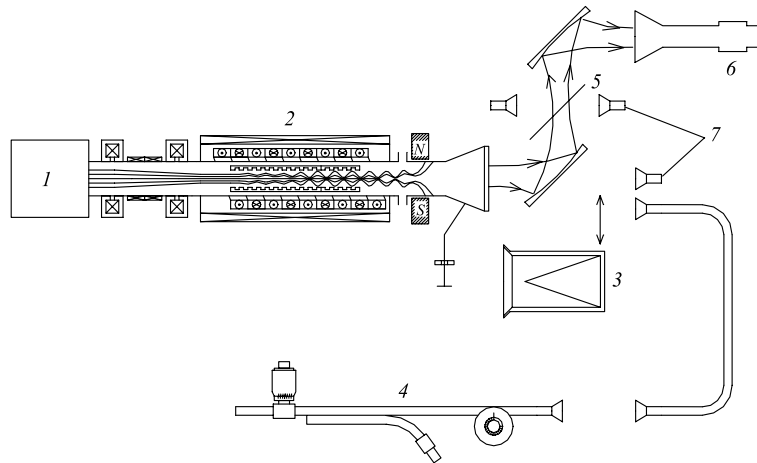


Рис. 3. Схема эксперимента: 1 — инжектор пучка (ускоритель ЛИУ-3000); 2 — МСЭ-генератор; 3 — калориметр; 4 — спектрометр; 5 — квазиоптический тракт; 6 — тестовая структура; 7 — детекторы СВЧ-мощности

добротность одной из собственных мод резонатора значительно превышает добротности остальных мод. В МСЭ-генераторе с резонаторами этого типа, а также в ЛБВ-усилителе на частотах, соответственно, 30,7 и 36,4 ГГц была

зарегистрирована группировка пучка ускорителя ЛИУ-3000 в черенковском оптическом излучении с помощью стрик-камеры (рис. 2) [11]. Черенковское излучение возникало при прохождении сгруппированного пучка через мишень из аэрогеля [10] с показателем преломления $n \approx 1,10$.

Полученные результаты позволили использовать указанный тип МСЭ-генератора в экспериментах по тестированию ускоряющей структуры коллайдера CLIC (схема эксперимента показана на рис. 3), начатых в ОИЯИ совместно с ИПФ РАН (Нижний Новгород) по предложению CERN в 2000 г. Как показано в [12], среди факторов, ограничивающих допустимый темп ускорения на частотах $30 \div 90$ ГГц, определяющим становится импульсный нагрев внутренней поверхности ускоряющей структуры, который за время импульса может достигать нескольких сотен градусов. Проведенные измерения спектра СВЧ-излучения показали, что частота генерации хорошо совпадает с частотой ускоряющей структуры коллайдера CLIC, а ширина спектра составляет около 0,1 %.

Продолжение работ по модернизации установки позволит получать новые результаты как в решении данной важной технической задачи, так и в дальнейших исследованиях новых схем МСЭ.

3. РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Во второй половине 20-го века источники когерентного оптического излучения — лазеры — оказали заметное влияние на развитие целого ряда фундаментальных исследований и прикладных применений. Интенсивные разработки в области лазерной физики и техники привели к заметному расширению спектра в сторону инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов. На протяжении последних десятилетий велись интенсивные разработки лазеров, работающих в рентгеновском диапазоне. Однако эта проблема не была решена, и трудно ожидать ее решения в обозримом будущем из-за больших сечений поглощения коротковолнового излучения в активной среде и низких коэффициентов отражения зеркал. Современное состояние дел с квантовыми генераторами таково, что область длин волн короче 100 нм (граница вакуумного ультрафиолета) практически недостижима для обычных лазеров.

В лазере на свободных электронах электромагнитное излучение усиливается электронным пучком при прохождении ондулятора — магнитного элемента со знакопеременным магнитным полем. Электронный пучок усиливает излучение в узком спектральном интервале вблизи резонансной длины волны

λ , связанной с периодом ондулятора λ_u следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad (1)$$

где $\gamma = E/(m_e c^2)$ — релятивистский фактор; $K = eB_u \lambda_u / (2\pi m_e c^2)$ — параметр ондуляторности; B_u — амплитуда магнитного поля.

До недавнего времени качество электронных пучков позволяло получать сравнительно небольшой коэффициент усиления излучения за проход ондулятора, поэтому для достижения необходимой мощности излучения использовались оптические резонаторы, подобно обычным квантовым генераторам, и многоступенчатый режим работы ускорителя. Это позволило создать ЛСЭ инфракрасного, оптического и ультрафиолетового диапазона. Тем не менее схема ЛСЭ с резонатором, как и в случае с обычными лазерами, не позволяет продвинуться далеко в область коротких длин волн, заметно короче границы вакуумного ультрафиолета. Решение проблемы рентгеновского ЛСЭ стало возможным после развития технологии производства и ускорения интенсивных электронных пучков высокого качества (имеющих малые энергетический разброс и эмиттанс). В рентгеновском ЛСЭ усиление излучения происходит за один пролет электронного пучка в ондуляторе. При этом мощность излучения на начальной стадии растет экспоненциально с длиной ондулятора [13]:

$$P(z) = AP_{\text{in}} \exp(2z/L_g), \quad (2)$$

где L_g — длина нарастания; P_{in} — мощность входного излучения; A — коэффициент связи ($A = 1/9$ в рамках одномерной теории ЛСЭ). В случае рентгеновского ЛСЭ процесс усиления начинается из флуктуаций плотности электронного пучка (дробового шума). Для ЛСЭ-диапазона вакуумного ультрафиолета эффективная мощность дробового шума P_{in} составляет величину порядка нескольких ватт, для рентгеновского ЛСЭ — несколько киловатт. Предельный коэффициент усиления определяется нелинейными эффектами и в режиме насыщения составляет величину порядка $G = P_{\text{sat}}/P_{\text{in}} \sim 10^8$.

Из резонансного условия (1) непосредственно видны основные преимущества ЛСЭ по отношению к квантовым генераторам — возможность плавной перестройки длины волны излучения (например, с помощью изменения энергии электронов) и усиления излучения с очень короткой длиной волны, в том числе и рентгеновского излучения. Так как активной средой ЛСЭ является электронный пучок, движущийся в вакууме, отпадают принципиальные ограничения на усиление коротковолнового излучения. Ввод в строй рентгеновских лазеров откроет беспрецедентные перспективы для фундаментальных и прикладных применений в различных областях биологии, химии и физики.

Последние два десятка лет велись активные поиски путей создания электрон-позитронных коллайдеров с энергией в центре масс ~ 200 ГэВ. Была

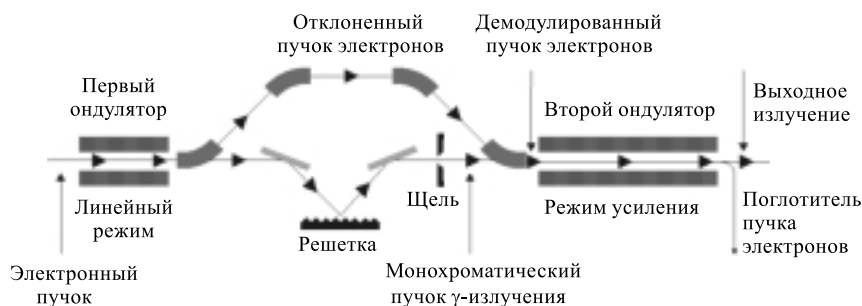


Рис. 4. Схема двухкаскадного рентгеновского ЛСЭ на ТТФ

разработана концепция линейных коллайдеров, и в ряде ведущих ускорительных центров началась разработка их проектов, в том числе в рамках международной коллаборации TESLA, объединяющей 39 институтов из 9 стран. Анализ проектных параметров электронного пучка линейного коллайдера TESLA показал, что они идеально подходят для создания ЛСЭ рентгеновского диапазона. В результате сформировалась концепция линейного коллайдера, интегрированного с рентгеновским ЛСЭ. Для проверки основных технических решений проекта в середине 90-х гг. в DESY (Гамбург) было начато сооружение тестового ускорителя «TESLA Test Facility» (ТТФ) [14]. Параллельно с ускорительной программой на ТТФ реализуется программа по созданию рентгеновского лазера на свободных электронах, которая легла в основу сотрудничества ОИЯИ–DESY в области развития линейных коллайдеров. Важной частью этой программы является создание регенеративного ЛСЭ-усилителя [15], оборудование для которого было разработано и изготовлено в Дубне и Польше.

С теоретической точки зрения описание лазера на свободных электронах представляет собой достаточно сложную самосогласованную задачу взаимодействия ансамбля частиц с полями излучения и пространственного заряда. На базе проведенных теоретических разработок [16] были исследованы фундаментальные принципы работы рентгеновского ЛСЭ, изучены статистические свойства излучения, разработан комплекс программ для численного моделирования ЛСЭ.

Рентгеновский ЛСЭ обладает большим потенциалом для увеличения яркости выходного излучения по сравнению с классической однопролетной схемой, где яркость излучения ограничена неполной продольной когерентностью вследствие старта процесса усиления излучения из дробового шума электронного пучка. Была разработана схема двухкаскадного ЛСЭ-усилителя

Параметры рентгеновских ЛСЭ на TESLA Test Facility и TESLA

Параметры	TTF	TESLA
<i>Ускоритель</i>		
Энергия, ГэВ	1	30
Пиковый ток, А	2500	5000
Нормализованный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	2	1,6
Длина сгустка, мкм	50	25
Частота повторения, Гц	10	5
Число сгустков в макроимпульсе	7200	11315
<i>Ондулятор</i>		
Период, см	2,73	5
Амплитуда поля, Тл	0,5	1,1
Длина, м	25	90
Радиус пучка в ондуляторе, мкм	57	30
<i>Излучение</i>		
Минимальная длина волны, Å	60	1
Пиковая мощность, ГВт	3	40
Средняя мощность, Вт	50	200
Размер излучения на выходе, мкм	90	100
Угловая расходимость, мкрад	15	0,8
Ширина спектра, %	0,2	0,08
Длительность импульса, фс	400	100
Пиковая яркость*	$2,2 \cdot 10^{30}$	$8,7 \cdot 10^{33}$
Средняя яркость*	$8 \cdot 10^{23}$	$4,9 \cdot 10^{25}$

* В единицах $\text{фотон} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{мрад}^{-2} \cdot \text{мм}^{-2} \cdot (0,1 \% \Delta\lambda/\lambda)^{-1}$.

(см. рис. 4), которая в настоящий момент принята как основная для рентгеновского ЛСЭ на TTF [17]. В этой схеме первый ондулятор с монохроматором играет роль задающего лазера, обеспечивающего продольно- и поперечно-когерентный входной сигнал для второго ондулятора. В результате выходное излучение имеет на два порядка большую яркость по сравнению с классической схемой. Параметры рентгеновских ЛСЭ, используемых на TTF и TESLA, приведены в таблице.

Первые экспериментальные результаты на рентгеновском ЛСЭ в DESY, полученные в феврале 2000 г., продемонстрировали обоснованность научного подхода к созданию рентгеновского лазера и правильность принятых технических решений [18]. Ускоритель работал на энергии $180 \div 260$ МэВ, и ЛСЭ производил мощное, плавно перестраиваемое излучение в области ва-

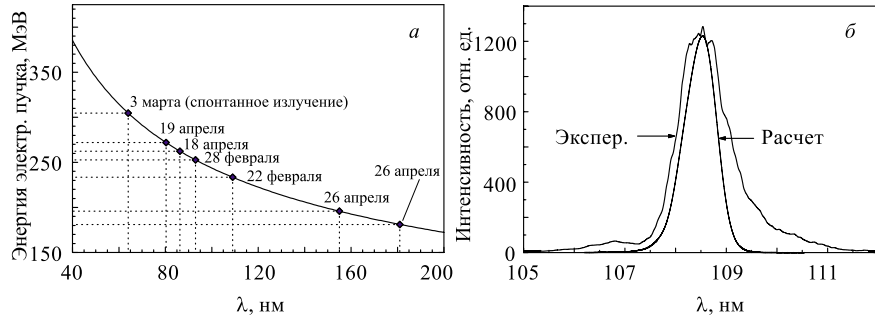


Рис. 5. а) Экспериментальные результаты по перестройке длины волны на рентгеновском ЛСЭ в DESY. б) Типичный усредненный спектр излучения рентгеновского ЛСЭ в DESY. Различие экспериментальных и теоретических результатов связано с имевшей место во время измерений нестабильностью энергии ускорителя

куумного ультрафиолета $80 \div 180$ нм (см. рис. 5). Коэффициент усиления мощности излучения (2) составил величину $\sim 10^5$ и был ограничен доступной длиной ондулятора (13,5 м). Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями, что является надежной основой для планирования будущих рентгеновских ЛСЭ: регенеративного ЛСЭ-усилителя [15] (ввод в эксплуатацию в 2001 г.), двухкаскадного ЛСЭ-усилителя с повышенной яркостью [17] (ввод в эксплуатацию в 2003 г.) и комплекса рентгеновских ЛСЭ на линейном коллайдере TESLA (ввод в эксплуатацию в конце текущего десятилетия).

4. ДИАГНОСТИКА КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ

Особенность многих криогенных систем состоит в том, что тепло, выделяющееся от криостатируемого объекта при заданной температуре, должно быть передано к охлаждающему двухфазному криогенному потоку, паросодержание которого увеличивается за счет подведенной энергии. Для криостатирования сверхпроводящих СП-магнитов ЛНС и СП-резонаторов TESLA будет использоваться двухфазный поток сверхтекучего гелия. Одна из задач диагностики этих систем состоит в измерении паросодержания двухфазного потока гелия и температур как криостатируемого объекта, так и криоагента.

В двухфазном парожидкостном потоке величины давления и температуры не определяют однозначно термодинамического состояния. Чтобы определить его, нужно также знать расходное массовое паросодержание $x = G_g / (G_g + G_l)$ или истинное объемное паросодержание $\phi = A_g / (A_g + A_l)$

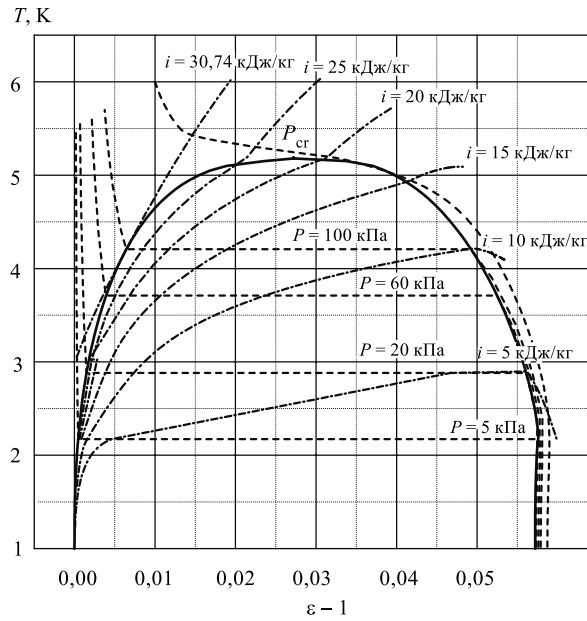


Рис. 6. Термодинамическая диаграмма «температура — диэлектрическая проницаемость» для гелия

потока, где G — расход; A — площадь поперечного сечения канала; индексы g и l относятся к пару и жидкости. Определение величины x для криоагентов представляется довольно сложным. Однако, поскольку криоагенты — диэлектрики, проще найти величину ϕ , используя датчики, чувствительные к диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon = \varepsilon_g \phi + \varepsilon_l (1 - \phi)$. В этом случае можно определить ϕ , измеряя, например, температуру насыщения T_s и ε . Это иллюстрирует построенная термодинамическая диаграмма «температура — диэлектрическая проницаемость» для гелия, которая представлена на рис. 6 [19].

На практике каналы для двухфазных криоагентов могут быть кольцевого и круглого поперечных сечений. Исследования показали, что режимы течения в этих каналах различны и переходы от одного режима к другому обусловлены разными причинами [20]. Различны и подходы к созданию емкостных датчиков паросодержания с каналами кольцевого и круглого сечений. При этом необходимо учитывать, что различия в величинах ε_g и ε_l довольно малы для криоагентов: около 4% для гелия и около 18% для водорода. Поэтому точность измерений должна быть примерно на два порядка выше, т. е.

0,04 %. Кроме того, для обеспечения адекватных измерений датчик должен быть снабжен участками гидродинамической стабилизации потока до и после измерительного участка. Более того, для корректных измерений предпочтительны устройства с равномерным электрическим полем в чувствительном участке.

Для создания датчиков с каналами как кольцевого, так и круглого поперечных сечений выбран высокочастотный метод, когда исследуемая среда заполняет объем резонатора, резонансная частота f которого зависит от степени заполнения, т. е. от ε . За последние годы были созданы ВЧ-датчики обоих типов. Отличительная особенность датчиков круглого сечения состоит в том, что их гидравлическое сопротивление минимально, однако сигнальный диапазон ($\Delta f = f_g - f_l$) примерно в 4–5 раз меньше по сравнению с кольцевым аналогом. Это накладывает более жесткие требования на измерительную систему. Последняя разработка — датчик для измерения ϕ двухфазного потока сверхтекучего гелия для ТТФ (TESLA) [21], отличающийся следующими особенностями:

- собственная резонансная частота датчика зависит только от ε и не зависит от температуры T , если $T < 4,5$ К;
- отсутствие элементов электроники внутри и около датчика, что повышает надежность при криогенных температурах.

В 2000 г. завершено создание стенда калибровки ВЧ-датчиков [19], который включает в себя две установки с миникриостатами диаметром 40 и 56 мм и длиной около 1 м и соответствующими автоматизированными системами измерения. Калибруемые термометры вставляются в сравнительные блоки (9 и 17 шт.), которые помещаются в миникриостаты, погружаемые, в свою очередь, в криостаты для жидкого гелия. Погрешность воспроизводства реперных точек не превышает 3 мК. Назначение процедуры калибровки — преобразовать диаграмму $T - \varepsilon$ в конкретную диаграмму $T - f$ и получить соответствующую калибровочную кривую $\phi = \phi(\varepsilon_g, \varepsilon_l, f)$. Созданный стенд позволяет калибровать датчики на гелии, водороде, азоте и других крио-агентах.

С целью выбора температурных датчиков для проекта TESLA совместно с ЛНФ были проведены исследования характеристик платиновых и углеродных термометров при гамма-облучении до очень больших доз — 1 МГр [22]. Облучение проводилось в жидком азоте и при комнатной температуре $T_{O.C.}$, а затем оценивалось послерадиационное поведение в жидком гелии, жидком азоте и при $T_{O.C.}$. Результаты облучения при 77,3 К представлены на рис. 7. Все отечественные термометры — платиновые, стеклоуглеродные производства ВНИИФТРИ и ТВО-резисторы — удовлетворяют предъявляемым техническим требованиям. Контактные группы платиновых термометров фирмы «Heber&Braun» (Германия) могут разрушаться при дозах $\sim 0,5$ МГр или в послерадиационный период. Партия датчиков ТВО для ТТФ доставлена в

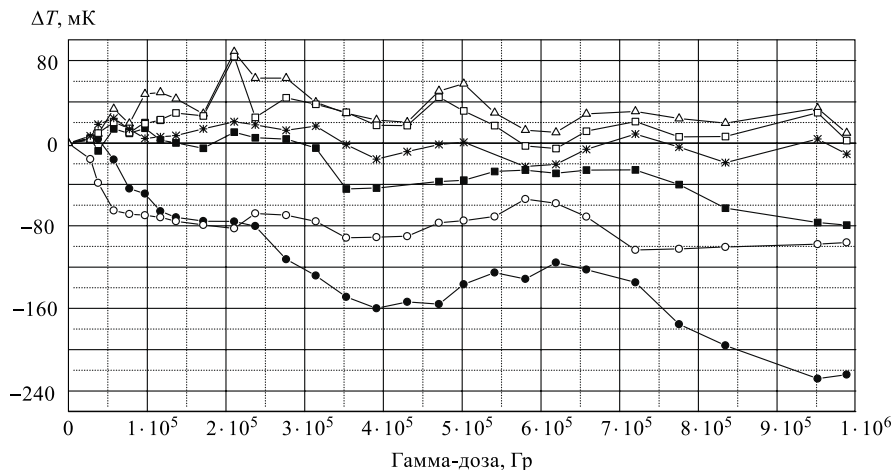


Рис. 7. Температурный сдвиг датчиков ΔT , вызванный гамма-облучением при 77,3 К, в зависимости от общей дозы: ■ — TVO(V3); ● — TVO(V6); Δ — PRT-D(N3); □ — PRT-D(N5); ○ — CRT-2; * — PRT-7

DESY. К настоящему времени совместно с ЛНФ завершены исследования отечественных термометров (железородиевых, платиновых, стеклоуглеродных и резисторов ТВО) при облучении быстрыми нейтронами (поток до 10^{16} см $^{-2}$) при азотных и комнатных температурах, а также в послерадиационный период при 4,2, 77 и 300 К.

Потребности в температурных датчиках на основе резисторов ТВО (предложенных для этой цели в ЛВЭ ОИЯИ) для работы в СП-магнитных системах, с одной стороны, и довольно противоречивая литературная информация об их температурных сдвигах ΔT за счет магнитного поля B — с другой, побудили нас провести дополнительные исследования. Анализ полученных данных показал, что величина $\Delta T/T$ находится в диапазоне от $-2,8$ до $-6,4\%$, например, для $T = 4,2$ К и $B = 6$ Тл, что значительно превышает данные ЛВЭ: -1% [23]. Для произвольно выбранных датчиков ТВО величина $\Delta T/T$ в диапазонах от 1,8 до 4,2 К и до 9 Тл в первом приближении пропорциональна относительному магнитосопротивлению $\Delta R/R$ и обратно пропорциональна безразмерной чувствительности $S = (T/R)(dR/dR)$. Характерные прогнозируемые значения: $|\Delta T/T| = 5,7 \div 13,9\%$ (1,8 К, 9 Тл); $|\Delta T/T| = 2,8 \div 6,4\%$ (4,2 К, 6 Тл); $|\Delta T/T| = 0,8 \div 1,7\%$ (4,2 К, 3 Тл).

Таким образом, отечественные ВЧ-системы измерения паросодержания двухфазных потоков и криогенные температурные датчики способны обес-

печить надежные измерения в физических и промышленных установках в условиях высоких радиационных нагрузок, магнитных полей и широкого диапазона криогенных температур.

5. РАЗРАБОТКА УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Одним из многообещающих и принципиально новых средств для инициирования и проведения различных физических и химических процессов в индустрии будущего являются интенсивные пучки заряженных частиц мощностью 100 кВт и более, в особенности пучки электронов. Такие пучки могут быть легко модулированы во времени и в пространстве и тем самым рабочий режим ускорителя электронов может быть оптимально согласован с требованиями технологического процесса. Уникальные возможности электронных пучков привлекают большое внимание и приводят к быстрому развитию исследований новых технологий, основанных на инициировании физических и химических процессов интенсивными электронными пучками. Область применения радиационных технологий распространяется от получения новых материалов, модификации полимеров, стерилизации инструментов и дезинфекции отходов в медицинских учреждениях до решения глобальных экологических проблем.

Наиболее высокие мощности и энергии электронных пучков требуются в промышленности для очистки от вредных окислов NO_x и SO_x дымовых газов тепловых и электрических станций, металлургических предприятий, мусоросжигающих установок и т. д. В настоящее время наиболее проработанным и экспериментально изученным считается электронно-лучевой метод очистки дымоходных газов, предложенный японской фирмой «Ebara». В этом методе дымоходный газ смешивается с аммиачно-водной пылью и облучается мощным электронным пучком. Результатом плазменно-химических реакций является преобразование вредных окислов азота и серы в соли аммония (нитраты и сульфаты), которые являются ценными сельскохозяйственными удобрениями и, как сопутствующий продукт, повышают коммерческий потенциал метода. Для очистки огромных потоков дымовых газов мощных промышленных предприятий (порядка $(1 \div 5) \cdot 10^{11}$ м³/ч) требуются пучки быстрых электронов мощностью от 200 до 1000 кВт с энергией 700–800 кэВ [24].

Недавно был предложен новый метод удаления окислов NO_x и SO_x , основанный на инициировании физических и химических процессов электронным пучком без использования аммиачного метода [25]. В этом методе газовая смесь подвергается комбинированному воздействию пучка электронов и быстрой газовой струи, состоящей из смеси газов $\text{N}^2 + \text{H}^2$. В этих условиях

активированная электронным пучком газовая струя приводит к преобразованию окислов азота и серы в компоненты чистого воздуха, воду и серу, которая считается более ценным продуктом, чем нитраты и сульфаты аммония. Если же дымоходный газ предварительно подвергнуть воздействию жесткого ультрафиолетового излучения в постоянном электрическом поле, то это позволит частично отделить вредные окислы от остальной массы газа, что существенно увеличит эффективность данного метода и его коммерческий потенциал. Благодаря уменьшению количества газа, облучаемого электронным пучком, и уменьшению требуемой энергии электронов (200–400 кэВ) потребление энергии резко сокращается. Это аналогично использованию катализатора в химической реакции.

В ЛФЧ ведется разработка и исследование нового, нетрадиционного направления в технике ускорителей для радиационных технологий. Разрабатываемый ускоритель имеет следующие конструктивно-технологические особенности:

- использование холодных катодов с пороговыми эмиссионными характеристиками допускает применение синусоидального напряжения для формирования импульсов тока электронного пучка;
- многопучковый, многооконный вариант ускорителя позволяет конструировать систему вывода электронного пучка с очень большой суммарной площадью выводных окон посредством увеличения числа малых окон;
- малые размеры выводных окон позволяют уменьшить толщину выводных фольг и потери энергии электронов в фольгах;
- использование источника высокого напряжения, основанного на коаксиальном вакуумном резонаторе, существенно улучшает добротность и эффективность преобразования энергии промышленной сети в энергию электронного пучка.

Для проверки указанных выше новых технических решений была создана масштабная модель ускорителя (рис. 8) со следующими параметрами: энергия электронов 200 кэВ, импульсный ток пучка 1 А, длительность импульса 10 мкс, частота повторения импульсов 18 кГц, средняя мощность пучка 20 кВт [26]. Экспериментальный опыт, полученный при работе с этой моделью, позволил начать в 2000 г. работы по созданию полномасштабной модели ускорителя с энергией 500–700 кэВ и выходной мощностью 25–35 кВт [27]. Параметры электронного пучка ускорителя: суммарный пиковый ток 0,5 А, длительность импульса 10–20 мкс, частота повторения 10–20 кГц.

Кроме того, была исследована возможность повышения эффективности радиационных технологий посредством использования вторичных электронов для возбуждения молекул газовой смеси. Поскольку число вторичных электронов существенно превышает число первичных быстрых электронов, их участие в процессе возбуждения может существенно усилить плазмохимическое инициирование процессов конверсии вредных окислов газовой смеси.



Рис. 8. Схема модели ускорителя на энергию 200 кэВ для радиационных технологий

В традиционных ускорителях для радиационных технологий, которые имеют непрерывный пучок электронов, возможность применения постоянного во времени электрического поля для увеличения энергии вторичных электронов до величины, превышающей порог возбуждения, ограничена электрическим пробоем плазменного промежутка. Поэтому в работе [28] предлагается использовать ВЧ-электрическое поле. В разрабатываемом в ЛФЧ ускорителе импульсный ток электронного пучка формируется ВЧ-полем.

Измерения интенсивности спектральных линий оптического излучения возбужденных молекул показали, что плотность возбужденных молекул может быть увеличена в десятки раз при увеличении напряженности электрического поля, в которое инжектируется электронный пучок 200 кэВ модели ускорителя. Процесс увеличения эффективности возбуждения молекул газа имеет пороговый характер. Пороговая напряженность электрического поля немного отличается для различных спектральных линий и лежит в районе 6–8 кВ/см. Полученные предварительные результаты показывают, что имеется принципиальная возможность существенного увеличения эффективности возбуждения молекул электронным пучком и повышения производительности радиационно-стимулированных процессов конверсии вредных примесей газовой смеси.

6. РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СИНХРОТРОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ В ЛФЧ

С 1962 г. группой под руководством В.И.Векслера, а впоследствии В.П.Саранцева [29] развивался метод коллективного ускорения ионов электронными кольцами. Эксперименты, проведенные в 1970 г. на модели кол-

лективного ускорителя, продемонстрировали высокую эффективность ускорения ионов собственным электрическим полем электронного кольца. Был получен темп набора энергии α -частиц в спадающем магнитном поле около 40 МэВ/м [30]. Последующие работы по созданию прототипа коллективного ускорителя привели к созданию нового направления в физике и технике ускорителей — формирование релятивистских двухкомпонентных колец с большой плотностью электронов. Поведение таких электронно-ионных колец в процессе накопления ионов и их совместного ускорения во внешних электромагнитных полях являлось предметом экспериментальных исследований в течение длительного времени, поскольку из-за большой плотности электронов и присутствия ионов возникали неустойчивости, которые не наблюдались ни в одном из классических ускорителей электронов. В связи с этим необходимо было адекватно выбрать методы диагностики электронно-ионных колец. Одним из самых эффективных явилось наблюдение синхротронного излучения (СИ) электронного кольца.

Впервые СИ электронного кольца в видимой области спектра наблюдалось в середине 70-х гг. В дальнейшем оно стало главным объектом наблюдений, что дало возможность создать ряд актуальных методик, позволивших проследить процесс накопления ионов, установить границы параметров электронно-ионных колец и избежать проявления неустойчивостей. Впервые удалось наблюдать в электронно-ионных кольцах во внешнем слабофокусирующем магнитном поле эффект уширения углового распределения СИ в видимой области спектра [31], возникающий за счет электрического поля ионной компоненты. Работы на прототипе коллективного ускорителя завершились успешным ускорением ионов азота во внешних электромагнитных полях, что в последующем позволило перейти к созданию полномасштабного ускорителя тяжелых ионов.

Исследование СИ электронного кольца коллективного ускорителя с большой плотностью электронов, которая недостижима в накопителях электронов, привела к мысли о его использовании для спектроскопических целей. Экспериментально было показано, что яркость СИ от электронного кольца коллективного ускорителя в инфракрасном диапазоне более чем в 100 раз превышает все известные источники излучения [32]. К концу 80-х гг. в связи с обнаружением Беднорцем и Мюллером высокотемпературной сверхпроводимости в оксидных соединениях $\text{LaSr}_x\text{CuO}_4$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ с температурой сверхпроводящего перехода $T \geq 40$ К стали очень актуальными исследования оптических свойств этих материалов в инфракрасном спектре, одним из направлений которых было измерение величины энергетической щели 2Δ и ее температурной зависимости, являющейся фундаментальной характеристикой сверхпроводящей системы, позволяющей установить механизм сверхпроводимости в новых высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалах. Из-за большого поглощения инфракрасного излучения в ВТСП-материалах

на существовавших источниках инфракрасного излучения нельзя было измерить эту величину с хорошей точностью в схеме на пропускание. В связи с этим на пучке СИ на коллективном ускорителе тяжелых ионов был создан спектрометр для исследований спектров пропускания высокотемпературных сверхпроводников в широком спектральном диапазоне $\Delta r = 10 \div 1000 \text{ см}^{-1}$ и в интервале температур $5 \div 300 \text{ К}$ [33]. С помощью спектрометра можно измерить спектры пропускания за время, равное нескольким миллисекундам, используя то обстоятельство, что спектр СИ электронного кольца с изменяемой во время ускорения электронов энергией перестраивается от длинноволнового участка до коротковолнового. На рис. 9 представлена временная эволюция спектра СИ электронного кольца. Измеренная зависимость энергетической щели от температуры для ВТСП-пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ свидетельствовала об отклонении вблизи температуры перехода от теоретического представления, даваемого теорией Бардина–Купера–Шриффера (БКШ).

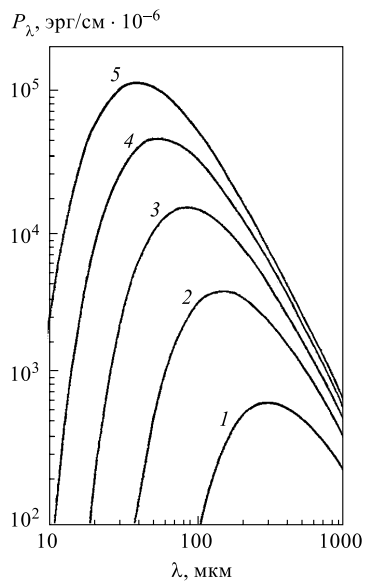


Рис. 9. Мгновенные спектры СИ для разных моментов времени: 1 — 1,7 мс; 2 — 1,9 мс; 3 — 2,1 мс; 4 — 2,3 мс; 5 — 2,5 мс

Проведенные исследования на пучке СИ коллективного ускорителя позволили накопить опыт в этой области и сформулировать направления будущих исследований. К этому времени была завершена работа по созданию специализированного источника СИ в РНЦ «Курчатовский институт» (на базе ускорителя «Сибирь-2»), который имеет следующие параметры: энергия электронов $E_e = 2,5 \text{ ГэВ}$, ток накопленных электронов $I_e = 100 \text{ мА}$, критическая энергия квантов рентгеновского излучения $E_e = 6,9 \text{ кэВ}$. Было решено создать на пучке СИ установку для исследований ближнего порядка неупорядоченных квазикристаллических систем. Для этих целей создается энергодисперсионный спектрометр EXAFS (Extended X-ray Fine Structure) [34], имеющий следующие параметры: диапазон энергий квантов рентгеновского диапазона $3 \leq E_\gamma \leq 30 \text{ кэВ}$, энергетическое разрешение в этом диапазоне $\Delta E \leq 6 \text{ эВ}$, время измерения $\Delta t = 3 \div 5 \text{ мс}$. Установка обладает следующими отличительными особенностями:

— возможность измерять спектры поглощения EXAFS с временным разрешением, что позволит исследовать влияние внешних динамических воздействий на структуру образца;

- минимальный размер образца может составлять $0,1 \div 0,2$ мм;
- отсутствие механической перестройки по длинам волн при измерении EXAFS-спектров.

В настоящее время завершена разработка основных узлов спектрометра: оптической скамьи из гранита на аэростатических опорах, рентгеновского монохроматора с треугольным кристаллом с изменяемым радиусом кривизны, криогенного позиционно-чувствительного детектора. Идет завершение монтажных работ на станции EXAFS-спектроскопии в РИЦ «Курчатовский институт», использование которой дает большие возможности исследований в области физики конденсированных сред.

7. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ИСТОЧНИКОВ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

В последние десятилетия происходит интенсивное развитие и разработка источников многозарядных ионов [35], которые являются первым звеном в цепочке элементов, составляющих ускоритель тяжелых ионов, и их характеристики определяют параметры и эффективность всего ускорительного комплекса. Большинство из существующих типов источников ионов, использующихся для производства многозарядных ионов, основано на последовательной ионизации электронным ударом. Решающими критериями их функционирования являются распределение зарядовых состояний производимых ионов и интенсивность извлекаемых пучков ионов. Проблема образования, накопления и производства ионов является центральной проблемой источника ионов с ионизацией электронным ударом.

Источники ионов на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР) и электронно-лучевые источники ионов (ЭЛИИ) являются сегодня основными видами источников с последовательной ионизацией электронным ударом [35]. Исследования в области физики источников ионов начались в ОИЯИ в начале 80-х гг., в связи с идеями использования легких малозарядных ионов для охлаждения тяжелых многозарядных ионов и отбора энергии ионов из пучка ЭЛИИ (ионное охлаждение).

В начале 90-х гг. в ЛФЧ ОИЯИ начались интенсивные исследования по физике ЭЦР-источников [36]. Одним из основных результатов этих исследований явилась разработка модели образования и накопления ионов в источнике на электронно-циклотронном резонансе [37, 38], рассматривающая процессы упругого и неупругого рассеяния в плазме, а также классическое удержание заряженных частиц в открытой магнитной ловушке. Она впервые позволила объяснить численно основные эффекты, связанные с производством многозарядных ионов в источнике ионов на ЭЦР.

ЭЦР-источник является открытой магнитной ловушкой для удержания плазмы. Специальные катушки создают продольное поле с сильными магнитными ловушками на концах оси симметрии. Постоянный мультипольный магнит используется для азимутальной вариации продольного магнитного поля. Электроны и положительно заряженные ионы генерируются из нейтрального газа в камере источника в результате ионизации электронным ударом горячими электронами. Относительно холодные электроны, возникающие в результате ионизации нейтральных атомов и ионов, нагреваются до энергии в несколько кэВ полем радиочастотного микроволнового излучения, чья частота равна частоте ларморовского вращения электронов в продольном магнитном поле ловушки. Экстракция ионов производится через отверстие на оси с приложением отрицательного потенциала к ускоряющему промежутку. Увеличение степени ионизации в ионном источнике является результатом последовательной ионизации в течение периода удержания ионов. Средняя степень ионизации зависит от плотности электронов, распределения электронов по энергиям и времени жизни ионов в источнике.

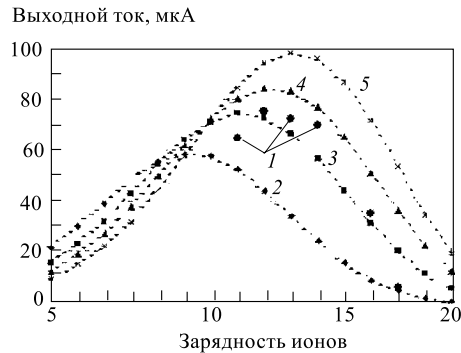


Рис. 10. Зависимость зарядового распределения от отношения давления нейтрального Кг к O_2 . Экспериментальное распределение 1 получено при Кг: O_2 как 1:2 и $P = 520$ Вт. Расчетные плотности электронов и подаваемые ВЧ-мощности: Кг: O_2 как 1:0 (2) — $n_e = 0,56 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $P = 90$ Вт; 1:1 (3) — $n_e = 1,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $P = 260$ Вт; 1:2 (4) — $n_e = 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $P = 500$ Вт; 1:4 (5) — $n_e = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $P = 1060$ Вт

по ускорителю ионов свинца на ускорительном комплексе PS и SPS в CERN в 1993–1995 гг. С помощью этих исследований определены основные пара-

Физическая модель и ее математические уравнения [37,38] дают возможность качественного описания количественного моделирования процессов накопления и производства ионов в постоянном и импульсном режимах работы ЭЦР-источника. Критериями для выбора и подгонки параметров плазмы при моделировании являются экспериментально полученные зарядовые распределения и ВЧ-мощность. Они могут быть использованы для оценки плотности и энергии электронов, полученных в результате моделирования.

В 1992 г. было начато сотрудничество по физике многозарядных источников ионов между ОИЯИ и CERN. Программа ОИЯИ–CERN по теоретическим исследованиям, направленная на усовершенствование источников ионов, осуществлялась в рамках программы

метры плазмы ЭЦР-источника в CERN и предложены возможные пути для усовершенствования источников ионов [39].

За последние три-четыре года в рамках сотрудничества с RIKEN (Япония) и LNS INFN (Италия) были проведены наиболее важные теоретические исследования по образованию и накоплению ионов в ЭЦР-источнике. В течение нескольких последних лет ЭЦР-источник в RIKEN непрерывно усовершенствовался путем оптимизации каждой его компоненты. Источник работает на частоте 18 ГГц и способен производить ионы различных газов и металлов. Для изучения параметров плазмы в зависимости от подаваемой ВЧ-мощности и выявления роли эффекта «смеси газов» было проведено численное моделирование производства ионов Kг и Хе [40]. На рис. 10 показана зависимость выходного зарядового распределения от соотношения давлений нейтрального Kг и O₂ в камере источника.

Численное моделирование и интерпретация экспериментальных результатов для ЭЦР-источника RIKEN позволили впервые оценить параметры электронного компонента ЭЦР-плазмы и входную мощность ВЧ. Новые уравнения дают возможность представить электроны в ЭЦР-плазме как многокомпонентную среду [41]. Распределение электронов по энергии может быть аппроксимировано последовательностью максвелловских распределений с различными температурами и весами.

Новый сверхпроводящий ЭЦР-источник SERSE был разработан и сконструирован в INFN-LNS (Катания, Италия) и CEA-DRFMC (Гренобль, Франция), испытан в Гренобле и смонтирован в Катании в середине 1998 г. Источник SERSE характеризуется магнитным полем до 2,7 Тл и пробочным отношением магнитного поля до 7. Комбинация из двух или трех 14 ГГц/18 ГГц ВЧ-генераторов, предназначенная для нагрева плазмы, обеспечит выходную ВЧ-мощность до 4 кВт. Источник имеет длинную плазменную камеру длиной ~ 50 см и диаметром ~ 13 см. Такие характеристики обеспечивают



Рис. 11. Сопоставление экспериментальных (1, 3, 5, 7) и расчетных (2, 4, 6, 8) зарядовых распределений аргона. Чистый аргон: 1 — $P = 1,09$ кВт; 2 — $N_e = 1,0 \cdot 10^{12}$ см⁻³, $T_e = 6$ кэВ, $P = 1,0$ кВт. Аргон: кислород: 3 — оптимизация для Ar^{11+} , $P = 0,47$ кВт; 4 — 6:1 по нейтралам, $N_e = 1,7 \cdot 10^{12}$ см⁻³, $T_e = 7$ кэВ, $P = 1,7$ кВт; 5 — оптимизация для Ar^{12+} , $P = 1,2$ кВт; 6 — 6:1 по нейтралам, $N_e = 1,8 \cdot 10^{12}$ см⁻³, $T_e = 8$ кэВ, $P = 1,9$ кВт; 7 — оптимизация для Ar^{15+} , $P = 1,4$ кВт; 8 — 3:2 по нейтралам, $N_e = 2,0 \cdot 10^{12}$ см⁻³, $T_e = 13$ кэВ, $P = 1,8$ кВт

уникальные условия для производства многозарядных ионов для инъекции в циклотрон установки INFN–LNS. На рис. 11 сопоставлены экспериментальные и расчетные зарядовые распределения [42].

С 1995 г. ЛФЧ участвовала в исследовательско-конструкторских работах по проектированию линии транспортировки низкоэнергетического пучка (LEBT) между лазерным источником ионов и ионным RFQ в CERN. Численное моделирование результатов, полученных при транспортировке пучка ионов Ta, было проведено для оптимизации «теплого» LEBT в CERN.

В 1999 г. в сотрудничестве с RIKEN был подготовлен и начат новый проект по применению модели крупных частиц в компьютерных программах и численном моделировании для многокомпонентной ЭЦП-плазмы [43]. Новая численная модель будет использоваться для детального изучения характеристик плазмы и пучка, функции распределения частиц, переходов ионов из одного зарядового состояния в другое, неупругих столкновений частиц и рассмотрения нелинейных полей.

В последние годы экспериментальная деятельность была связана с исследованиями на ЭЦП-источниках в RIKEN, Франкфурте и ЛЯР ОИЯИ с целью усовершенствования их работы и получения большей информации об основных характеристиках ЭЦП-плазмы. На стенде ЛФЧ ОИЯИ были разработаны и проверены средства рентгеновской диагностики горячей плазмы и инъекции лазерной эрозионной плазмы в ЭЦП-разряд. Также было предложено модулирование напряжения смещения на вспомогательном электроде, всесторонне изученное во Франкфурте и в Дубне. В RIKEN было обнаружено, что выходные параметры ЭЦП-источника в импульсном режиме работы коррелируют с присутствием в ЭЦП-разряде горячего электронного компонента, и присутствует эффект длительного (> 100 мс) тормозного излучения из плазмы после выключения микроволнового нагрева электронов. Динамика тормозного излучения изучена с использованием рентгеновской спектроскопии с временным разрешением. В результате было предложено объяснение этого эффекта и проведено его численное моделирование.

Был изучен эффект диска с напряжением смещения в режиме модуляции напряжения смещения [44]. Обнаружено, что извлекаемые токи ионов реагируют на изменения напряжения на диске настолько быстро, что это не может быть объяснено в терминах дополнительного увеличения скорости производства ионов. До сих пор подобное увеличение скорости рождения ионов являлось общепринятым объяснением эффекта. Наши наблюдения, однако, указывают на связь эффекта с улучшением условий для извлечения ионов. Предполагалось, что вдоль оси источника формируется осциллирующий пучок электронов, что увеличивает плотность плазмы вблизи области экстракции. При модуляции напряжения на диске наблюдалось импульсное увеличение извлекаемых ионных токов, что может быть использовано в практических целях.

Инжекция лазерной эрозийной плазмы была успешно испытана на ЭЦР-источнике во Франкфурте [45], и сейчас готовятся испытания на DECRIS-3 (ЛЯР ОИЯИ). Для Cd- и Zn-мишеней были обнаружены пучки ионов. Найдено, что метод импульсной инъекции атомов металлов в ЭЦР-разряд позволяет определить основные параметры ЭЦР-плазмы: плотность электронов, температуру электронов и время удержания ионов.

В заключение следует подчеркнуть еще раз, что за последнее десятилетие в ЛФЧ были получены серьезные достижения в области физики многозарядных ионов. Появилась теория производства ионов в ЭЦР-источниках, стимулировавшая экспериментальные исследования в RIKEN, в университете Франкфурта. В настоящее время в стадии подготовки находятся также новые, многообещающие эксперименты в ЛФЧ и ЛЯР ОИЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов И. Н., Мельников В. А.* // Тр. XIV Совещ. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1990. Т. 3. С. 280.
2. *Melnikov V. A.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391. P. 93.
3. *Ivanov I. N., Melnikov V. A.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391. P. 52.
4. *Аверьянов В. И. и др.* // Материалы II науч. семинара памяти В. П. Саранцева. Дубна, 1998. С. 114.
5. *Sessler A. M.* // AIP Conf. Proc. 1982. V. 91. P. 154.
6. *Ginzburg N. S. et al.* // Proc. of the Free Electron Lasers Conf.'96. Elsevier Science B.V., 1997. P. 11.
7. *Ginzburg N. S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 407. P. 167.
8. *Kaminsky A. A. et al.* // Part. Accel. 1990. V. 44. P. 189.
9. *Conde V. E., Bekefi G.* // Nucl. Instr. Meth. 1992. A. V. 318. P. 109.
10. *Елжов А. В. и др.* // Тр. III науч. семинара памяти В. П. Саранцева (Дубна, 22–23 сент. 1999 г.). Дубна, 2000. С. 118.
11. *Kaminsky A. K. et al.* // Proc. of European Particle Accelerator Conf.'2000. Vienna, 2000. P. 2075.
12. *Nazhevenko O. A.* // Proc. of Particle Accelerator Conf.'97. Vancouver, 1997. P. 3013.
13. *Saldin E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov M. V.* The Physics of Free Electron Lasers. Springer, 1999; ref. therein.
14. TESLA Test Facility Linac: Design Report. DESY Print TESLA 95-01. Hamburg, 1995.
15. *Faatz B. et al.* DESY Print TESLA-FEL 97-07. Hamburg, 1997;
Faatz B. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 429. P. 424.
16. *Roszbach J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 374. P. 401;
Saldin E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov M. V. // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 381. P. 545; ibid. 1996. V. 375. P. 241; ibid. 1996. V. 375. P. 336; 385; ibid. 1997. V. 398. P. 373; ibid. 1997. V. 393. P. 119; ibid. 1998. V. 407. P. 112; 285; 291; ibid. 1998. V. 417. P. 158; ibid. 1999. V. 429. P. 41; 197; 229; 233; ibid. 2000. V. 445. P. 40; 178; 320;

- Krzywinski J. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 401. P. 429;
Brefeld W. et al. // Ibid. 1997. V. 393. P. 119;
Roszbach J. et al. // Ibid. P. 152;
Reiche S. et al. // AIP Conf. Proc. 1997. V. 413. P. 29;
Saldin E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov M. V. // Ibid. 1997. V. 413. P. 195; 291;
Saldin E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov M. V. // Optics Commun. 1998. V. 148. P. 383;
Faatz B. et al. // Ibid. P. 302;
Saldin E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov M. V. // AIP Conf. Proc. 1999. V. 468. P. 258; P. 321.
17. *Saldin E. L. et al.* // SPIE Proc. 1997. V. 2988. P. 145;
Feldhaus J. et al. // Optics Commun. 1997. V. 140. P. 341; Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 393. P. 162; AIP Conf. Proc. 1997. V. 413. P. 219.
 18. *Andruszkow J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 3825.
 19. *Filippov Yu. P. et al.* // Cryogenics. 2000. V. 40. P. 279.
 20. *Filippov Yu. P.* // Cryogenics. 1999. V. 39. P. 59.
 21. *Filippov Yu. P., Kovrizhnikh A. M., Romanov S. V.* // Proc. of the ICEC'18. 2000. P. 631.
 22. *Filippov Yu. P. et al.* // Proc. of the ICEC'18. 2000. P. 627.
 23. *Микляев В. М. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2000. № 4[101]. С. 46.
 24. *Chmielewski A. G.* Raporty IChTJ. B (Warszawa). 1999. 1/99.
 25. *Kukulin V. I.* JINR Report E12-99-217. Dubna, 1999.
 26. *Dolbilov G. V. et al.* // Proc. of the 6th European Particle Accelerator Conf. Stockholm, 1998. P. 2398.
 27. *Dolbilov G. V. et al.* // Proc. of 7th European Accelerator Conf. Viena, June 26–30, 2000. P. 904.
 28. *Fainstein A. L. et al.* Application Electron Beams and Pulsed Discharges to Flue Gases Treatment. M., 1993. P. 10.
 29. *Саранцев В. П., Перельштейн Э. А.* // Физика плазмы. 1977. Т. 3. С. 449.
 30. *Саранцев В. П. и др.* // ЖЭТФ. 1971. Т. 60. С. 1980.
 31. *Казаринов Н. Ю. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-81-428. Дубна, 1981.
 32. *Scintee N. N., Tiutiunnikov S. I., Shaliapin V. N.* // SPIE Proc. 1997. V. 3135. P. 253.
 33. *Tiutiunnikov S. I., Shaliapin V. N.* // Nucl. Res. and Meth. in Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 265.
 34. *Aksenov V. et al.* // Nucl. Res. and Meth. in Phys. Res. A. 2000. V. 448. P. 122.
 35. *Shirkov G., Zschornac G.* Electron Impact Ion Sources for Highly Charged Ions. Wiesbaden, 1996.
 36. *Shirkov G. D.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391. P. 117.
 37. *Shirkov G.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 322. P. 161.
 38. *Shirkov G.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1993. V. 2. P. 250.
 39. *Shirkov G.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1995. V. 98. P. 536.
 40. *Shirkov G., Nakagawa T.* // Rev. Sc. Instr. 1998. V. 69(2). P. 1141.
 41. *Shirkov G.* // Rev. Sc. Instr. 2000. V. 71. P. 850.
 42. *Gammino S., Ciavola G., Shirkov G.* // Phys. Scripta. B. 1999. V. 80. P. 519.
 43. *Shirkov G., Batygin Yu., Yano Y.* Preprint RIKEN-AF-AC-5. Saitama, 1997;
Shirkov G. et al. Preprint RIKEN-AF-AC-24. 2000.

44. *Hohn O. et al.* // Proc. of the 14th Conf. on EC Ion Sources (ECRIS), CERN, Geneva, May 3–6, 1999. P. 180–182;
Runkel S. et al. // Ibid. P. 183–186.
45. *Mironov V. et al.* // Proc. of the 14th Conf. on ECR Ion Sources (ECRIS99), CERN, Geneva, May 3–6, 1999. P. 212;
Stiebing K. E. et al. // Phys. Rev. ST Accel Beams. 1999. V. 2. P. 123502.