

Академия наук Российской Федерации
Государственный комитет Российской Федерации
по науке и технологиям
Министерство Российской Федерации по атомной энергии
Объединенный институт ядерных исследований

XV СОВЕЩАНИЕ ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
Протвино, 22-24 октября 1996 года

Сборник докладов
в 2-х томах

Том 2

Протвино 1996

Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-200 для комплекса ИРЕН ОИЯИ

А.В. Новохатский, Н.С. Диканский, Б.А. Скарбо, С.В. Шиянков
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

А.М. Долгов, Г.М. Куперман
Российский институт мощного радиостроения, Санкт-Петербург, Россия

В.К. Антропов, С.Н. Доля, А.А. Каминский, А.К. Красных, Э.М. Лазиев,
В.Г. Пятаев, В.Т. Руденко, А.П. Сумбаев, В.И. Фурман, В.А. Швец
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В.А. Сеньюков
Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

Установка ИРЕН создается как интенсивный импульсный источник резонансных нейтронов. Так же, как и действующий источник ИБР-30 [1,2], он представляет собой традиционную для ОИЯИ комбинацию из драйвера — линейного ускорителя электронов, и мишени — конвертера с размножающей оболочкой. Пучок ускоренных электронов в конвертере рождает потоки тормозных γ -квантов и фотонейтронов, которые размножаются в окружающей конвертер оболочке из делящегося материала (Pu_{239}). Импульсные потоки нейтронов из мишени используются для спектрометра времяпролетного типа высокого разрешения. Проект разработан с целью сокращения длительности импульса при сохранении высокой средней интенсивности нейтронов для повышения энергетического разрешения спектрометра. При коэффициенте размножения нейтронов ~ 28 и длительности нейтронного импульса 400 нс интегральный выход нейтронов источника составит $\sim 9 \cdot 10^{14} \text{ н/с}$ [2,3]. Выходные параметры источника ИРЕН обеспечат его конкурентоспособность и перспективность в качестве базовой установки ЛНФ ОИЯИ.

Концепция ускорителя-драйвера ЛУЭ-200 разработана в ИЯФ СО РАН [4]. Проектные параметры ИРЕН по выходу нейтронов задают среднюю мощность пучка электронов $\geq 10 \text{ кВт}$, что при длительности импульса 250 нс , значении тока электронов в импульсе $\sim 1.5 \text{ А}$ и частоте циклов 150 Гц определяет энергию электронов $\sim 200 \text{ МэВ}$. ЛУЭ-200 будет размещен вертикально в двух верхних этажах существующего трехэтажного здания установки ЛУЭ40 — ИБР30 (рис. 1). Ограничения по высоте помещений определяют темп набора энергии в ускоряющих секциях $\geq 35 \text{ МэВ/м}$. Ускоритель состоит из электронной пушки, группирователя, двух ускоряющих секций, источников СВЧ-мощности, систем фокусировки, диагностики, контроля и управления. Пушка, группирователь и первая секция с соответствующим модулятором и клистроном размещаются в верхнем этаже, вторая секция с модулятором и клистроном — этажом ниже. Ускоренный пучок транспортируется в нижний этаж к мишени.

В качестве прототипа источника электронов в проекте использован источник ϕ -фабрики ИЯФ СО РАН — пушка с оксидным катодом, постоянным катодным напряжением 200 кВ и сеточным управлением [4]. Конструкция и система управления пушки адаптированы к генеральной схеме ЛУЭ-200. Источник электронов должен обеспечивать на входе в группирователь пучок с током $1.5 - 2.0 \text{ А}$ в импульсе, эмиттансом $10 \text{ п см} \cdot \text{мрад}$ в пятне радиусом 4 мм .

Таблица 1. Параметры секции.

Рабочий тип колебаний	$2\pi/3$
Рабочая частота	2856 МГц
Длина одной секции	3032 мм
Групповая скорость	0.02 с
Добротность	$1.3 \cdot 10^4$
Шунтовой импеданс	53 МОм/м
Ускоряющий градиент	40 МэВ/м

Таблица 2. Параметры группирователя.

Рабочий тип колебаний	$2\pi/3$
Рабочая частота	2856 МГц
Фазовая скорость волны	0.7 с
Эффективность группировки	60%
Общая длина	243 мм
Входная имп. мощность	110 кВт
Рассеиваемая мощность	8.2 Вт

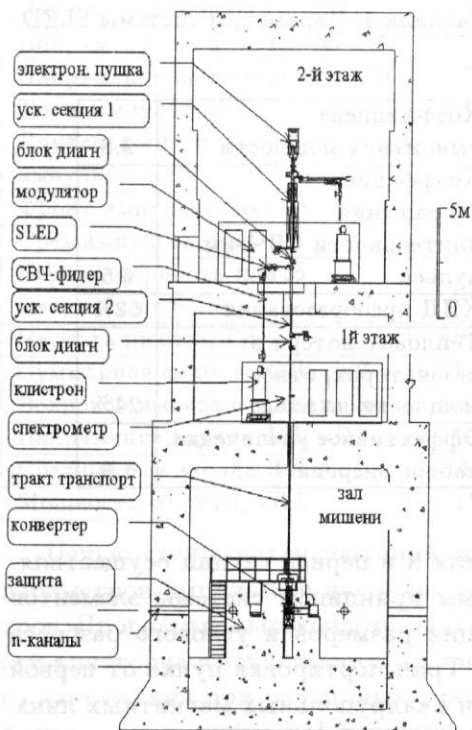


Рис. 1 Схема установки.

Как показывают расчеты [4], эффективность передачи мощности СВЧ в электронный пучок составляет $\sim 15\%$. Это означает, что при средней мощности электронного пучка ~ 10 кВт необходимо иметь источник СВЧ с суммарной мощностью ~ 70 кВт. Указанным требованиям оптимально удовлетворяют импульсные клистроны 5045 SLAC [5]. При частоте повторения, равной 150 Гц, требуемое значение средней мощности позволяют получить два клистрона 5045. Параметры клистрона приведены в табл. 3.

С выхода клистронов СВЧ-мощность ~ 60 МВт по прямоугольному вакуумированному волноводу сечением 72×34 мм поступает в систему умножения мощности (SLED) [4] и далее — в ускоряющие секции. В системе SLED (табл. 4) повышение импульсной мощности осуществляется за счет накопления СВЧ-энергии в накопительных резонаторах с последующим ее переизлучением в секцию. Переброс СВЧ-фазы на 180° осуществляется с помощью быстрого фазовращателя.

Из волноводного СВЧ-тракта первой ускоряющей секции часть мощности отвлекается для питания группирователя. В тракт группирователя вводятся аттенюатор и фазовращатель для регулировки амплитуды и фазы колебаний.

В качестве задающего генератора в МИФИ разработан и создан двухканальный синтезатор с цифровой установкой частоты, мощности в каждом канале и возможностью быстрой (≤ 15 нс) переброски фазы. Система предварительного усиления и СВЧ-возбуждения клистрона 5045 базируется на клистроне КИУ-37 станции

ОЛИВИН. Уровень и фаза колебаний СВЧ возбуждения регулируются с помощью поляризационных аттенуаторов и фазовращателей.

Таблица 3. Параметры клистрона 5045.

Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность	67 МВт
Длительность СВЧ-импульса	3.5 нс
Частота повторений	≤ 180 Гц
Средняя СВЧ-мощность при частоте повторения 150 Гц	37 кВт
Усиление по мощности	53 – 57 дБ
КПД	43 – 47%
Анодное напряжение U_a	350 кВ
Анодный ток	400 А
Фазовая чувствительность на 1% отклонения U_a	6°
Амплитуд. чувствительность на 1% отклонения U_a	1.5%

Таблица 4. Параметры системы SLED.

Коэффициент умножения мощности	3.8
Коэффициент сокращения длительности СВЧ-импульса	6.5
КПД преобразования	52%
Тепловые потери в резонаторах, относ. мощности на входе	24%
Эффективное увеличение набора энергии	1.9

Фокусировка пучка от пушки до группирователя и в первой секции осуществляется соленоидальным магнитным полем. Основным принципом системы элементов соленоидальной фокусировки является минимизация размеров и углового разброса частиц на входе в каждый последующий элемент. Транспортировка пучка от первой секции до мишени производится с помощью девяти квадрупольных магнитных линз.

Импульсный модулятор М-350 для клистрона 5045 SLAC разрабатывается на базе модулятора М-250 ускорительной станции ОЛИВИН [6]. Ускоряющие секции, группирователь и накопительные резонаторы системы SLED для ЛУЭ-200 разработаны и изготавливаются в ИЯФ СО РАН. Элементы мощных вакуумных волноводных трактов разработаны в МИФИ и изготовлены в НПО "Исток" (Фрязино). Основные агрегаты и функциональные элементы вакуумной системы будут изготовлены фирмой Vakuump-Praha (Чехия). Остальные технологические системы ЛУЭ-200 разрабатываются и изготавливаются в ОИЯИ.

Для экспериментального подтверждения возможности обеспечения проектного значения темпа набора энергии создается полномасштабный испытательный beam-off стенд, включающий основные модули и функциональные системы ускорителя: ускоряющую секцию, клистрон 5045, импульсный модулятор М-350, волноводные тракты, систему SLED, СВЧ-возбудитель, шкаф предварительного усиления, системы контроля, диагностики, управления и синхронизации и др. Программа работы стенда предусматривает исследование модулей и СВЧ-систем, включая испытания узлов и устройств с их паспортизацией перед монтажом на ускорителе.

Модуляторы М-250 и М-350 (табл. 5) представляют собой импульсные схемы с полным разрядом накопителя — формирующей линии (ФЛ) и резонансной зарядкой. Значения напряжения заряда ФЛ у модуляторов отличаются не более, чем на 20%. Значения среднего тока зарядки практически совпадают. Это позволяет после доработки использовать зарядную цепь М-250 в модуляторе М-350. Импульсная мощность в нагрузке М-350 превышает аналогичный параметр прототипа более, чем в два раза.

Таблица 5. Параметры модуляторов.

	М-250	М-350
Импульсная мощность, МВт	65	150
Напряжение на клистроне, кВ	50 – 250	50 – 350
Напряжение на выходе ФЛ, кВ	20	23.5
Ток в импульсе, кА	3.6	6.3
Длительность плато импульса, мкс	8.0	3.5
Фронт импульса, мкс	1.5	1
Срез импульса, мкс	2.7	1.8
Неравномерность плато импульса не более	0.3%	1%
Частота циклов, Гц	до 100	до 150
Суммарная емкость ФЛ, мкФ	1.05	0.7
Волновой импеданс линии, Ом	4	4
Напряжение заряда ФЛ, кВ	40.0	47.0
Средний ток заряда ФЛ, А	4.2	5.0
Мощность от сети, кВА	150	200

Целью стендовых испытаний модулятора М-350 является получение требуемых параметров импульса в нагрузке, воспроизводимости и повторяемости этих параметров. Программа высокочастотных испытаний включает измерение выходной мощности клистрона в зависимости от уровня мощности возбуждения, импульсного анодного напряжения при различных значениях частоты следования импульсов, измерения формы огибающей СВЧ-импульса, амплитудной и фазовой чувствительности клистрона при малых отклонениях параметров режима работы от их номинальных значений. Для модулей ЛУЭ-200 перед их монтажом на ускорителе выполняется цикл "холодных" радиотехнических измерений на низком уровне СВЧ-мощности: определение добротности и полного сопротивления, комплексного коэффициента передачи и времени заполнения секций, частотной и температурной зависимости указанных параметров, коэффициента умножения мощности в системе SLED. Измерение ускоряющего градиента в структуре ускорительной секции будет осуществляться по энергетическому спектру электронов темнового тока в секции.

Список литературы

- [1] Frank I.M. Particles and Nucleus. Vol 1, Part 2, Dubna 1972, p. 805-860.
- [2] Aksenov V.L. et al. Proposal For The Construction Of New Intense Resonance Neutron Source (IREN), E3-92-110, JINR, Dubna, 1992.
- [3] IREN Project. Intense Resonance Neutron source. Compiled by A.K. Krasnykh, V.L. Lomidze, A.V. Novokhatsky, Yu.P. Popov, W.I. Furman. Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, 1994.
- [4] Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN). A. Novokhatsky et al. In Proceedings of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory, p. 197, D1,9,13-93-459, Dubna, 1994, p. 197-211.
- [5] Allen M. et al. Performance of The SLAC Linear Collider Klystrons. SLAC-PUB-4262, March 1987.
- [6] Куперман Г.М. и др. Импульсный модулятор М-350 для клистрона 5045 SLAC. С-Петербург, 1995 (не опубликовано).

Частота следования импульсов и средняя мощность в нагрузке М-350 в полтора раза превышают те же параметры модулятора М-250. Поэтому разрядная цепь модулятора прототипа существенно переработана. Формирующее устройство состоит из двух ФЛ, заряжаемых от одного источника и разряжаемых одновременно на общую нагрузку — импульсный трансформатор. В каждой ячейке ФЛ последовательно включены два высоковольтных конденсатора ИМК-100-0.05.

Линейный ускоритель электронов источника синхротронного излучения "Сибирь-2"

В.Н. Корчуганов, Е.Б. Левичев, О.А. Нежевенко, Г.Н. Острейко,
Г.В. Сердобинцев, В.В. Тарнецкий, В.А. Ушаков, А.В. Филипченко
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
А.А. Кадников, Ю.В. Крылов, С.Н. Кузнецов, В.Л. Ушков, Ю.Л. Юпинов
РНИЦ "Курчатовский Институт", Москва, Россия

Линейный ускоритель выполнен на основе ускоряющей структуры с шайбами и диафрагмами с высоким шунтовым сопротивлением (95 МОм/м) и работает на частоте 2.8 ГГц. Он введен в действие в конце 1992 года, когда был получен электронный пучок с энергией 62.5 МэВ. В статье представлены экспериментальные ВЧ-характеристики ускоряющей структуры, а также результаты измерений тока, энергетического спектра, эмиттанса и профиля пучка. В настоящее время ЛУ инжектирует электронный пучок с энергией 75 МэВ в накопительное кольцо "Сибирь-1", и ведется работа по увеличению тока и энергии пучка.

Введение

Комплекс "Сибирь-2", разработанный в ИЯФ СО РАН, работает в РНИЦ "Курчатовский Институт" (г. Москва) в качестве источника синхротронного излучения [1]. Он состоит из накопительного кольца, с максимальной энергией 2.5 ГэВ, комбинации линейного ускорителя электронов [2] с энергией 80 МэВ и бустерного кольца "Сибирь-1" с энергией 450 МэВ (инжекционная часть). Бустерный накопитель "Сибирь-1" работает в одногустковом режиме с периодом обращения 29 нс, поэтому длительность импульса тока ЛУ не должна превышать 15-20 нс. ЛУ работает в режиме накопленной энергии.

1. ЛУ – форинжектор

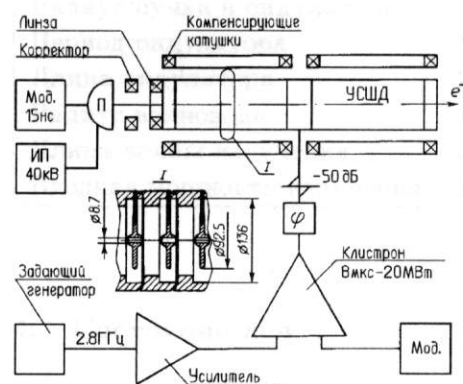


Рис. 1: Блок-схема линейного ускорителя.

Схема линейного ускорителя приведена на рис. 1. В качестве ускоряющей структуры ЛУ был выбран вариант структуры с шайбами и диафрагмами (УСШД) [3] с радиальными опорами шайб [4]. Каждая шайба поддерживается тремя радиальными опорами круглого сечения длиной, близкой к $\lambda/4$. Использование УСШД длиной 6 метров позволило обеспечить требуемую энергию и ток пучка для бустера "Сибирь-1" при использовании одного 18-МВт генератора.

Дисперсионные кривые структуры приведены на рис. 2, из которого видно, что в полосе ± 20 МГц относительно рабочей моды $TM_{02\pi}$ [5] отсутствуют высшие моды колебаний. Основные параметры структуры представлены в табл. 1.

Таблица 1:

Рабочая частота	2797.2 ± 0.1 МГц	Характ. сопрот.	3.4 ± 0.1 кОм/м
Эфф. шунт. сопрот.	95 ± 3 МОм/м	Перенапряжение	5.5
Добротность	28000 ± 100	Групповая скорость	0.4с

Результаты измерения распределения электрического поля на оси регулярной секции представлены на рис. 3. Возбуждение структуры осуществляется через специальную коаксиальную ячейку ввода ВЧ-мощности, расположенную в середине ускорителя и разделяющую его на два симметричных плеча. При этом ширина полосы между рабочей частотой и ближайшими нерабочими частотами увеличивается вдвое. Волновод (90×45 мм²) состоит из вакуумной и газовой секций, разделенных керамическим окном.

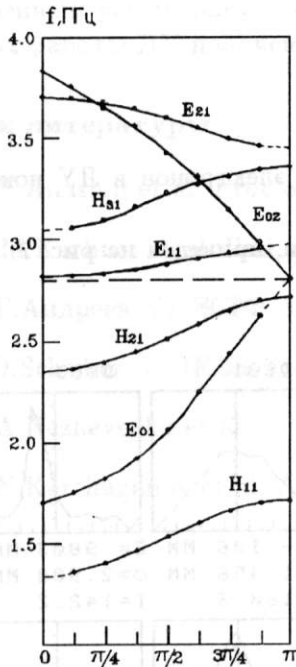


Рис. 2: Дисперсионные кривые.

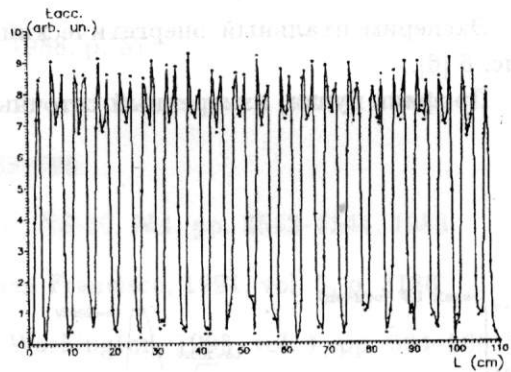


Рис. 3: Распределение поля на оси структуры.

Экспериментальные зависимости амплитуд падающей ($U_{\text{пад}}$) и отраженной ($U_{\text{отр}}$) волны в волноводе и напряжения на ускорителе ($U_{\text{ЛУ}}$) от частоты генератора приведены на рис. 4. Как видно из рисунка, длина волновода должна быть равна $(2n + 1)\lambda/8$. В этом случае в волноводе обеспечивается минимальное перенапряжение при расстройке структуры, либо пробоях в ней.

Осциллограммы ВЧ-сигналов ($U_{\text{пад}}$ — 1, $U_{\text{отр}}$ — 2, $U_{\text{ЛУ}}$ — 3) показаны на рис. 5. ЛУ имеет простую инжекционную систему (рис. 1) [5]. Процесс группирования происходит в первом резонаторе. Система фокусировки также проста (рис. 1). Фокусировка обеспечивается линзой и ВЧ-полем структуры. Входное отверстие первого резонатора закрыто сеткой.

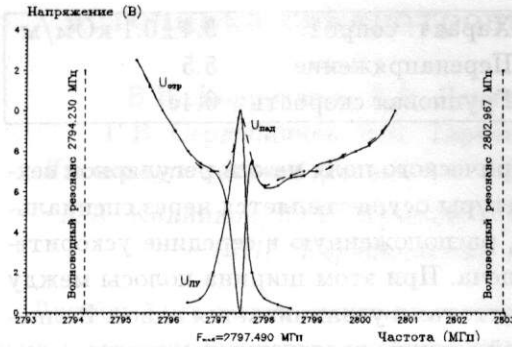


Рис. 4: ВЧ сигналы.

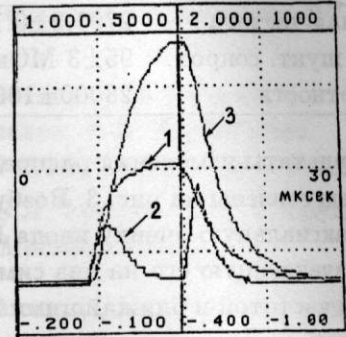


Рис. 5: Осциллограммы ВЧ-сигналов.

2. Эксперименты с пучком

Экспериментальный энергетический спектр пучка электронов в ЛУ показан на рис. 6 [6].

Профиль пучка, измеренный сеточными пробниками, приведен на рис. 7.

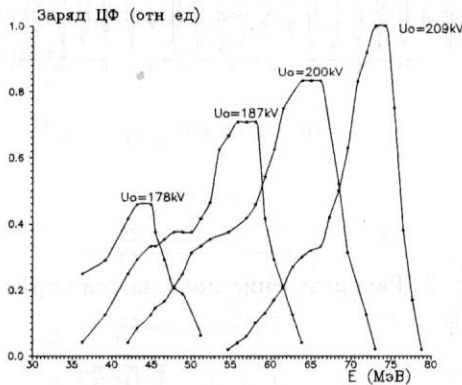


Рис. 6: Энергетический спектр пучка в ускорителе.

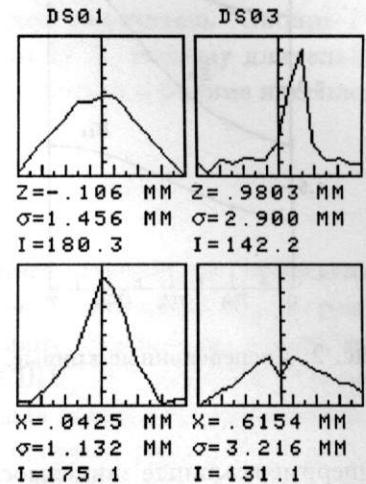


Рис. 7: Картинки профиля пучка.

В табл. 2 представлены результаты измерения параметров электронного пучка на выходе ускорителя.

Таблица 2:

Максимальная энергия	75 МэВ	Поперечный эмиттанс	0.03 мрад·см
Ток пучка в импульсе		Поперечный размер пучка на расстоянии 1600 мм от ЛУ	3 мм
$\Delta E/E=7\%$	600 мА	Частота повторения	1–5 Гц
$\Delta E/E=1\%$	65 мА		
Длительность импульса	18 нс		

В настоящее время ЛУ инжектирует электронный пучок с энергией 75 МэВ в накопительное кольцо "Сибирь-1". Захваченный на равновесную орбиту ток достигает 23 мА.

Заключение

Линейный ускоритель обеспечивает работу комплекса "Сибирь-2". В отдельных режимах работы ЛУ получена энергия электронного пучка 80 МэВ.

Список литературы

- [1] V.V.Anashin et al. Proc of EPAC, Rome, 1988, p. 57.
- [2] M.M.Karliner et al. Ibid, pp. 601–603.
- [3] В.Г.Андреев. // ЖТФ, 1971, т. 41, с. 788–796.
- [4] S.O.Schriber. // IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-30, №4, pp. 3542–3544, 1983.
- [5] O.A.Nezhevenko et al. // Proc. of PAC, San Francisco, 1991, vol. 5, p. 3186.
- [6] V.N.Korchuganov et al. // Proc. of PAC, Washington, 1993, vol. 1, pp. 564–566.

Ускорители электронов серии ЭЛВ: состояние, применение, развитие

Ю.И. Голубенко, М.Э. Вейс, Н.К. Куксанов, С.А. Кузнецов, Б.М. Корабельников,
А.Б. Малинин, П.И. Немытов, В.В. Прудников, Р.А. Салимов,

В.Г. Черепков, С.Н. Фадеев

ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, Россия

Начиная с 1971 года, Институт ядерной физики СО РАН разрабатывает и производит высоковольтные ускорители электронов типа ЭЛВ для применения в промышленных и исследовательских радиационно-технологических установках. В настоящее время Институт предлагает серию ускорителей электронов типа ЭЛВ, которые перекрывают диапазон энергий от 0.2 до 2.5 МэВ, с током пучка ускоренных электронов до 400 мА и максимальной мощностью до 400 кВт. Институтом поставлено как внутри страны, так и за рубежом, более 70 ускорителей серии ЭЛВ, общее время наработки которых составляет величину порядка 500 лет.

Унификация узлов и систем ускорителей повышает надежность и позволяет с минимальными затратами адаптировать их под конкретные требования заказчика по основным параметрам, таким как диапазон энергий, мощность пучка ускоренных электронов, длина выпускного окна. Применение газовой изоляции обеспечивает компактность ускорителей и удобство в эксплуатации.

Полный КПД ускорителя составляет величину около 70%, причем большинство потерь составляют потери электромашиного преобразователя частоты. Мы ведем работы по совершенствованию системы силового питания. Так, спроектированы, изготовлены и опробованы системы питания на основе тиристорных и транзисторных преобразователей частоты, что позволило увеличить полный КПД ускорителей до 85% для машин мощностью менее 100 кВт и до 95% для более мощных ускорителей.

Все ускорители этой серии управляются унифицированной системой управления, построенной на базе IBM-PC совместимого компьютера, которая предоставляет пользователю возможность организовать работу ускорителя в технологической линии в полностью автоматизированном режиме без участия оператора. Программное обеспечение осуществляет все необходимые оперативные переключения в системах ускорителя, непрерывно в процессе работы проверяет исправность высоковольтного выпрямителя, предоставляет обслуживающему персоналу широкий набор команд для предварительного задания режимов, для наладки ускорителя и т.п.

Основные параметры ускорителей ЭЛВ приведены на рис.1 и в таблице.

Электронный пучок выводится в атмосферу как через окно из титановой фольги, так и через систему отверстий с диафрагмами. Для расширения технологических возможностей мы разработали и изготавливаем системы двустороннего и кольцевого облучения, обеспечивающие эффективное использование пучка, выведенного в атмосферу через фольгу, при облучении кабелей или труб большого диаметра, а также двустороннее облучение лент шириной до 300 мм. Система эффективно работает при энергии электронов выше 1.7 МэВ. Принцип работы такой системы изображен на рис. 2. Система поставляется как дополнительное оборудование к типовой машине и легко устанавливается и удаляется при смене технологии.

	Диапазон энергий, МэВ	Мощность в пучке, кВт	Максимальный ток пучка, мА
ЭЛВ-мини	0.2 – 0.4	20	50
ЭЛВ-0.5	0.4 – 0.7	25	40
ЭЛВ-1	0.4 – 0.8	25	40
ЭЛВ-2	0.8 – 1.5	20	25
ЭЛВ-3	0.5 – 0.7	50	100
ЭЛВ-4	1.0 – 1.5	50	40
ЭЛВ-6	0.8 – 1.2	100	100
ЭЛВ-6М	0.75 – 1.0	160	200
ЭЛВ-8	1.0 – 2.5	90	50
ЭЛВ-12	0.8 – 1.0	400	400

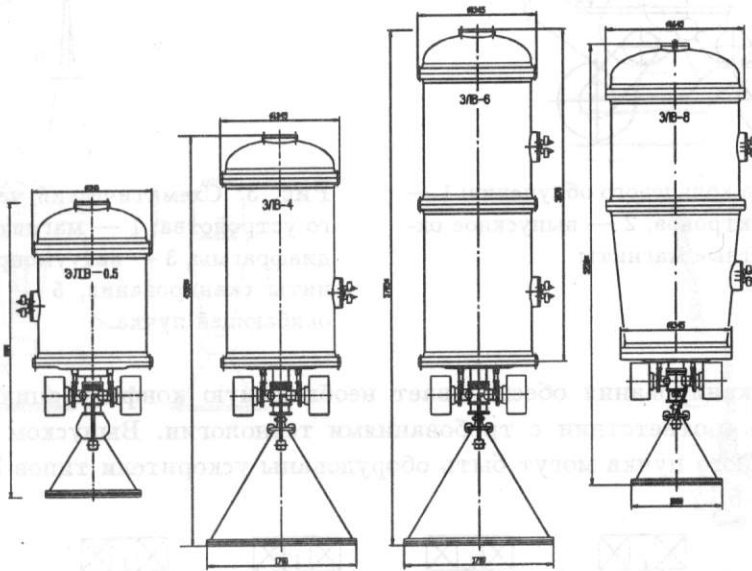


Рис. 1: Габаритные размеры ускорителей ЭЛВ с выводом пучка через фольгу.

Кроме указанных устройств, Институт поставляет подпучковое оборудование для облучения пленки, кабеля или трубок, а также проектирует в соответствии с требованиями заказчика, изготавливает и поставляет местную радиационную защиту для этих ускорителей.

Ускорители серии ЭЛВ применяются практически во всех технологических процессах, где требуется электронный пучок. Так ускорители с фольговым выпуском используются в следующих радиационно-технологических процессах:

- производство термоусаживаемых материалов; радиационная модификация полиэтиленовой изоляции проводов и кабелей;
- производство вспененного полиэтилена;
- производство резино-технических изделий;
- модификация строительных материалов;
- обработка сточных вод;
- обработка газовых выбросов;
- дезинсекция зерна.

Ускорители ЭЛВ могут быть оборудованы устройством для вывода электронного пучка в атмосферу через систему отверстий в диафрагмах (рис. 3). Размер пучка на выходе составляет величину не более 2 мм. Вакуум в ускорительной трубке обеспечивается системой дифференциальной откачки.

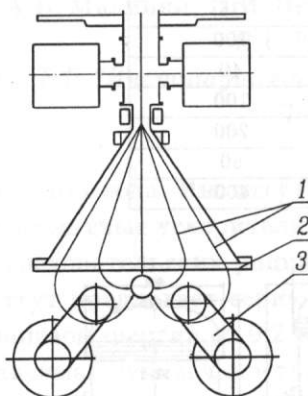


Рис. 2: Система кольцевого облучения: 1 — траектории электронов, 2 — выпускное окно, 3 — поворотные магниты.

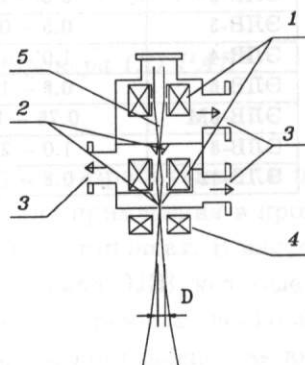


Рис. 3: Схематический чертеж выпускного устройства: 1 — магнитные линзы, 2 — диафрагмы, 3 — вакуумопроводы, 4 — магниты сканирования, 5 — примерный вид огибающей пучка.

Система сканирования обеспечивает необходимую конфигурацию дозного поля (см. рис. 4) в соответствии с требованиями технологии. Выпуском сфокусированного электронного пучка могут быть оборудованы ускорители типов ЭЛВ-2, ЭЛВ-3, ЭЛВ-4 и ЭЛВ-6.

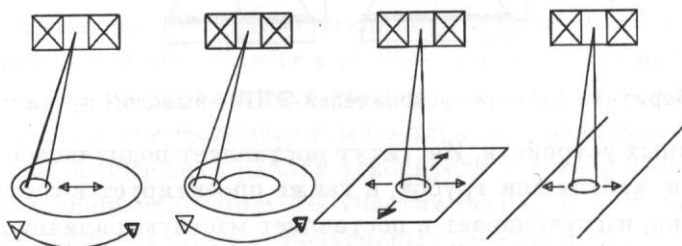


Рис. 4: Возможные конфигурации полей облучения.

Вследствие очень высокой плотности мощности такие машины применяются, в основном, в высокотемпературных процессах, таких как:

- поверхностная закалка и наплавка;
- сварка и резка при атмосферном давлении;
- производство катализатора синтеза аммиака;
- твердофазный синтез и спекание керамических материалов;
- испарение любых материалов;
- получение ультрадисперсных частиц;
- деструкция высокотоксичных или трудноразложимых веществ.

В настоящее время в нашем Институте разрабатываются ускорители нового поколения. В области машин с выпуском через фольгу мы спроектировали ускоритель с током пучка до 400 мА и двумя ускорительными трубками, соединенными с выпрямителем газовыми фидерами (рис. 5). В принципе, проектируемый выпрямитель, если будет потребность, сможет обеспечивать мощность до 1 МВт, при этом число излучателей будет увеличено.

В области машин с выпуском концентрированного пучка мы изготовили и испытали ускоритель "Факел" (рис. 6) с диапазоном энергии 0.5 – 0.8 МэВ и мощностью 500 кВт. Компрессия пучка осуществляется адиабатически нарастающим продольным магнитным полем.

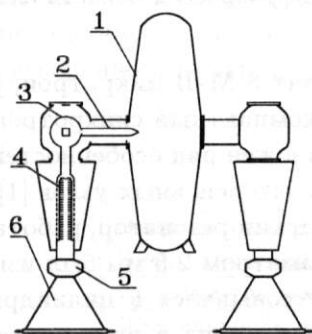


Рис. 5: Ускоритель ЭЛВ-12 мощностью 400 кВт: 1 — источник ускоряющего напряжения, 2 — газовый фидер, 3 — система управления инжектором, 4 — ускорительная трубка, 5 — система формирования растра, 6 — выпускное устройство.

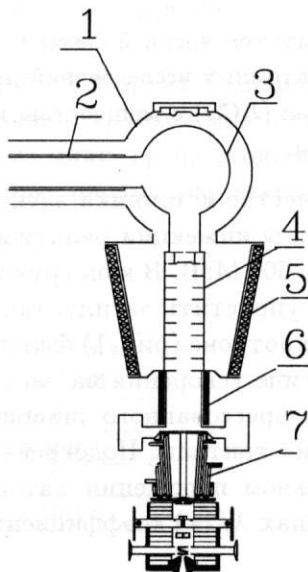


Рис. 6: Ускоритель "Факел": 1 — источник ускоряющего напряжения, 2 — газовый фидер, 3 — система управления инжектором, 4 — ускорительная трубка, 5;6;7 — система формирования растра и вакуумная система.

Вклад Института в развитие радиационных технологий заключается не только в разработке и изготовлении электронных ускорителей. В течение 20 лет в Институте эксплуатируется стенд для исследования и отработки электронно-лучевых технологий. Потенциальные потребители практически без каких либо ограничений могут проводить на нем эксперименты. Работы проводятся либо совместно, либо участие Института ограничивается на уровне консультаций.

Наработанный опыт проектирования и эксплуатации ускорителей серии ЭЛВ позволяет предложить покупателю машины, по своим параметрам не уступающие лучшим мировым образцам. Подтверждением этого являются неоднократные победы в конкурсах на поставку ускорителей с участием ведущих мировых фирм, производящих ускорители.

Компактный лазер на свободных электронах дальнего ИК-диапазона

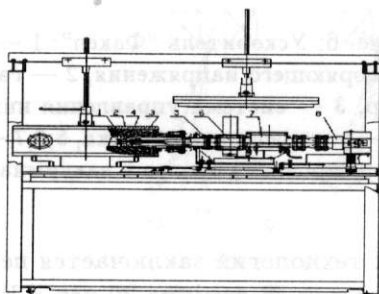
Р.Р. Акбердин, В.П. Белов, В.М. Боровиков, П.Д. Воблый, Ю.И. Великанов,
Н.А. Винокуров, Н.Г. Гаврилов, Б.А. Гудков, Е.И. Загородников, Е.М. Закутов,
Г.М. Казакевич, М.Н. Кондауров, Ю.М. Колокольников, Г.И. Кузнецов,
Г.Н. Кулипанов, А.Д. Орешков, А.С. Медведко, С.В. Мигинский, С.П. Петров,
В.М. Попик, В.В. Ращенко, Т.В. Саликова, С.С. Середняков, Г.И. Сильвестров,
Ю.Ф. Токарев, В.П. Черепанов, М.А. Хохлов

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработан для Корейского института атомных исследований проект и изготовлены основные части лазера на свободных электронах (ЛСЭ) с мощностью излучения один ватт в инфракрасной области спектра 25–30 микрон.

В качестве источника электронов для ЛСЭ был взят 8 МэВ микротрон, разработанный для инъекции релятивистских электронов в компактный синхротрон с энергией 200–600 МэВ. В конструкцию микротрона был заложен ряд особенностей, позволяющих упростить эксплуатацию и увеличить ресурс его основных узлов [1].

В микротроне (рис. 1) был использован цилиндрический резонатор, работающий в первом типе ускорения на частоте 2.8 ГГц. Катод диаметром 2.5 мм был изготовлен из горячепрессованного штабика LaB_6 . Катод запрессовывался в цилиндрическую обойму из тантала. Подогреватель был выполнен из тантала в виде траверс. При оптимальном положении катода, когда координата центра катода была $X_0 = 1.7$ (в единицах $\lambda/2\pi$) коэффициент захвата составлял 7.9%.



- | | |
|-----------------------|------------------|
| 1- полус | 2- обратное ярмо |
| 3- обмотка | 4- резонатор |
| 5- вакуумное окно | 6- ответвитель |
| 7- ферритовый вентиль | 8- магнетрон |

Рис. 1:

При мощности СВЧ-генератора около 1.5 МВт и коэффициенте связи резонатора $\beta = 2.7$, микротрон обеспечивал ток в макроимпульсе до 35 мА при энергии электронов $7.5 \div 8$ МэВ [2]. Генератором СВЧ служил магнетрон МИ-456.

В процессе эксплуатации микротрон продемонстрировал высокую надежность в работе, стабильность параметров и возможность их улучшения. Это предопределило его модернизацию по созданию на его основе ЛСЭ дальнего ИК-диапазона. В ходе модернизации была вдвое увеличена длительность импульса модулятора за счет увеличения числа звеньев искусственной линии. Линия тщательно настраивалась для получения минимальной модуляции и скола вершины импульса, подаваемого на магнетрон.

После модернизации модулятор стал обеспечивать получение импульса тока магнетрона длительностью не менее 6.5 мкс по уровню 0.9 при амплитуде тока до 130 А и напряжении на магнетроне до 55 кВ. Скол вершины импульса тока магнетрона при этом не превышал 1% [3].

Дальнейшим шагом модернизации явилось увеличение коэффициента связи резонатора до значения $\beta = 5.4$ при собственной добротности около 9200. С целью увеличения ресурса эксплуатации конструкция катода была усовершенствована [4]. Поликристаллический катод был заменен монокристаллом LaB_6 , что дало возможность при той же рабочей температуре катода увеличить эмиссию более чем в два раза. Кристалл LaB_6 запрессовывался в графитовую обойму. Это позволило исключить диффузию бора в тантал, что ранее приводило к механическому разрушению обоймы катода.

Ускоренный пучок электронов выводится с последней, 12-й орбиты микротрона. Измерения тока пучка на последней орбите перед выпускной трубкой микротрона и в электронно-оптическом канале ЛСЭ показывают, что из микротрона выводится не менее 80% ускоренного пучка. В табл. 1 приведены основные параметры микротрона.

Таблица 1:

Энергия электронов	7.3 ÷ 8 МэВ
Энергетический разброс	~ 16 КэВ
Средний ток электронов в импульсе	70 мА
Длительность макроимпульса	> 5 мкс
Пиковый ток	~ 1 А
Частота повторения макроимпульсов	1 ÷ 10 Гц

Из микротрона ускоренный пучок электронов выводится в электронно-оптический канал (рис. 2), предназначенный для транспортировки пучка до ондулятора и согласования параметров электронного пучка, выпущенного из микротрона с параметрами, оптимальными для работы ЛСЭ. Электронно-оптический канал состоит из трех тридцатиградусных поворотных электромагнитов и шести квадрупольных электромагнитных.

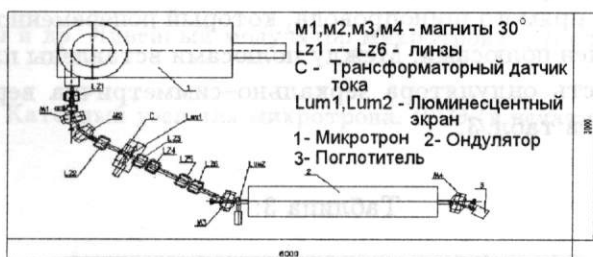


Рис. 2:

Для наблюдения за положением пучка в электронно-оптическом канале на первом прямом участке установлен люминесцентный экран. Имеются также один вводимый пробник с люминесцентным экраном перед входом в ондулятор и один вводимый пробник с датчиком переходного излучения. Датчик переходного излучения представляет собой две танталовые 5-мм пластинки с прорезями 0.5 мм, размещенными перпендикулярно. Верхняя пластинка покрыта пленкой алюминия для наблюдения переходного излучения. Щель 0.5x0.5 мм предназначена для сканирования профиля электронного пучка. Для измерения тока в макроимпульсе и временного профиля применяются вводимый коллектор внутри микротрона, трансформаторный датчик тока в электронно-оптическом канале и цилиндр Фарадея, совмещенный функционально с поглотителем после четвертого поворотного магнита.

Очень важным для работы ЛСЭ является выбор оптимальных параметров электронного пучка на входе в ондулятор. Для правильного выбора режима необходимо знать параметры электронного пучка на входе электронно-оптического канала. Для измерения параметров электронного пучка применялся метод измерения размера пучка в зависимости от градиента в линзах. Размеры электронного пучка определялись по размеру светового пятна на люминесцентном экране с использованием объектива и ПЗС-линейки, управляемой системой КАМАК-РС. Специальная компьютерная программа была написана для расчета параметров электронного пучка по измеренным размерам светового пятна. В табл. 2 приведены параметры электронного пучка в микротроне перед его выпускной трубкой.

Таблица 2:

Эммитанс ϵ_x	1.5 мм мрад
Betta, β_x	51.5 см
Alfa, α_x	-2.29
Gamma, γ_x	0.12
Эммитанс ϵ_y	4.9 мм мрад
Betta, β_y	444.8 см
Alfa, α_y	7.61
Gamma, γ_y	0.32
Энергетический разброс, $\Delta E/E$	0.002

Ондулятор ЛСЭ представляет собой оригинальную конструкцию. Верхняя часть ондулятора состоит из прямого шинпровода, который попеременно сверху — влево и сверху — вправо охвачен полюсами. Между полюсами вставлены плитки постоянных магнитов. Нижняя часть ондулятора зеркально-симметрична верхней. Параметры ондулятора приведены в табл. 3.

Таблица 3:

Период ондулятора	1.25 см
Количество периодов	160
Зазор	0.5 см
Коэффициент ондуляторности	0.4-0.6

На данном этапе проведены магнитные измерения элементов электронно-оптического канала и ондулятора, смонтирована вся установка, измерены параметры электронного пучка, просчитан оптимальный для работы ЛСЭ режим электронно-оптического канала и проведен пучок (рис. 3) через электронно-оптический канал (верхний график), ондулятор до поглотителя (нижний график); ведутся работы по проектированию и изготовлению оптического резонатора.

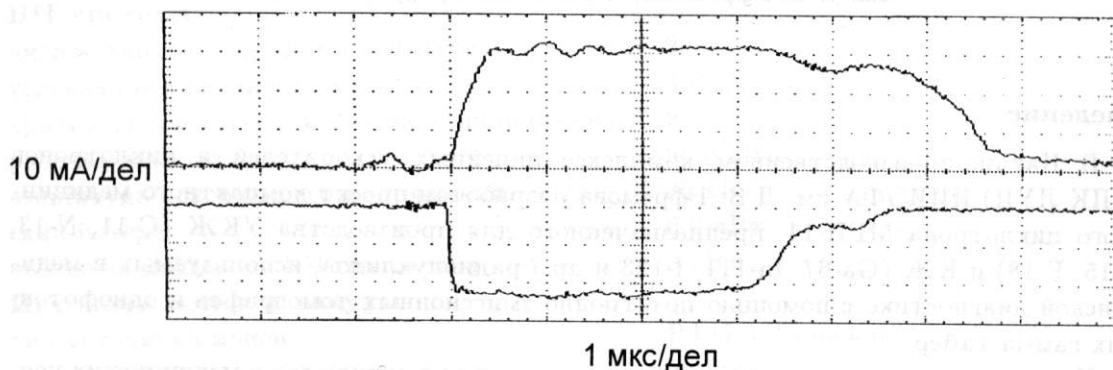


Рис. 3:

В настоящее время для создания ЛСЭ в инфракрасной области спектра в качестве источников электронов предпочтение отдается линейным ускорителям, которые имеют по сравнению с импульсными микротронами больший пиковый ток и длительность импульса, хотя микротроны имеют меньший энергетический разброс, несравненно меньшую стоимость и существенно проще в эксплуатации.

Полученные характеристики микротрона а также ускоренного электронного пучка позволяют применить в данном ЛСЭ довольно длинный ондулятор с малым периодом. Это позволяет рассчитывать на получение генерации за счет большого коэффициента усиления и надеяться на успешную работу ЛСЭ с данным микротроном.

Список литературы

- [1] Л.Л. Данилов и др. Микротрон-инжектор электронного синхротрона. Докл. XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, ИТЭФ, 1990.
- [2] G.M. Kazakevich et al. 8 MeV microtron — the injector for an electron synchrotron. II Asian Symposium on FEL. Novosibirsk, 1995, pp. 257-261.
- [3] Г.М. Казакевич и др. Линейный модулятор микротрона. (Доклад на настоящем совещании).
- [4] Г.И. Кузнецов. Катодный узел для микротрона. ПТЭ (в печати).

Проект мощного лазера на свободных электронах на базе разрезного микротрона-рекуператора

Н.А. Винокуров, Г.Н. Гаврилов, Э.И. Горникер, Д.А. Кайран,
Г.Н. Кулипанов, И.В. Кушцов, Г.Я. Куркин, Г.И. Эрг,
Ю.И. Левашов, А.Д. Орешков, С.П. Петров, В.М.Петров,
И.В. Пинаев, В.М. Попик, И.К. Седяров, Т.В. Шафган,
А.Н. Скринский, А.С. Соколов, В.Г. Вещеревич, П.Д. Вобльи
Институт ядерной физики им. Будкера, Новосибирск, Россия

В Новосибирском научном центре создается лазер на свободных электронах с большой средней мощностью. Цель данного проекта — обеспечить пользовательской установкой Сибирской центр фотохимических исследований. В статье описаны характеристики установки и состояние дел по проекту.

Введение

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) по сравнению с обычными лазерами имеют преимущества и недостатки (см., например, работы [1, 2]). Главными преимуществами являются перестраиваемость и высокая средняя мощность, а недостатками — радиационная опасность, большие размеры и стоимость. Одной из перспективных целей является создание ЛСЭ на среднюю мощность 0,1-1 МВт.

За последние пять лет мы разработали проект такого ЛСЭ для работы в инфракрасном диапазоне [3, 4]. Отличительными чертами данного проекта являются:

- Использование продемонстрированной ранее рекуперации энергии электронов [5] в разрезном микротроне-рекуператоре.
- Низкочастотная ВЧ-система [6].
- Использование так называемого “электронного вывода” света [7, 8].

1. Разрезной микротрон-рекуператор

Первый вариант проекта данного ускорителя был опубликован ранее [3]. Здесь же мы описываем вариант, модернизированный для ЛСЭ для Сибирского центра фотохимических исследований. Схема микротрона и его параметры показаны на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 1: Параметры микротрона-рекуператора.

Длина волны микротрона	166,3 см
Количество ВЧ-резонаторов	16
Количество дорожек	8
Амплитуда ВЧ-напряжения в резонаторе	0.8 МВ
Энергия инжекции	2 МэВ
Конечная энергия электронов	98 МэВ
Конечная длина электронных сгустков	20-100 пс
Конечный пиковый ток	20-100 А
Частота следования электронных сгустков	2-22,5 МГц
Средний ток	4-100 мА

Микротрон состоит из инжектора 1, двух магнитных 180° поворотных систем 2, общего прямолинейного промежутка с ВЧ-резонаторами 3 (промежуток является общим для электронов с различными энергиями), магнитов инжекционной системы 4 и системы вывода 5, фокусирующих соленоидов 6, восьми прямолинейных промежутков с квадрупольными линзами 7, магнитной системы ЛСЭ 8, размещенной на восьмом промежутке, и поглотителя 9.

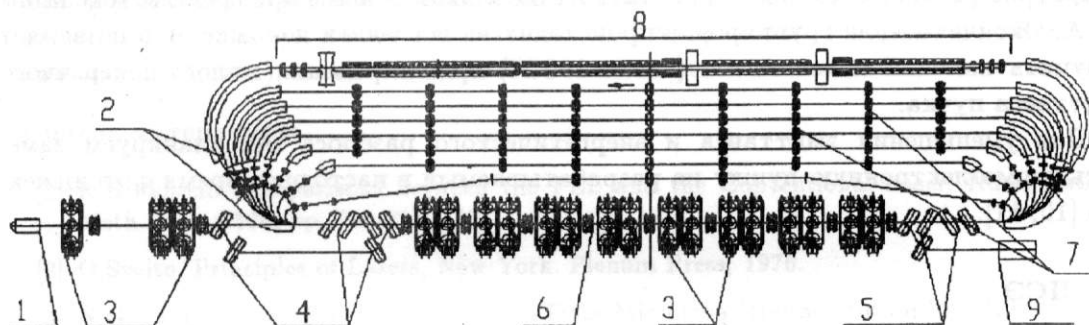


Рис. 1: Схема микротрона-рекуператора.

Электронная пушка инжектора на энергию 300 кэВ служит для получения 1 нс. электронных сгустков с частотой повторения 22,5 МГц. После прохождения модулирующего ВЧ-резонатора электронный сгусток сжимается в дрейфовом промежутке до 200 пс и ускоряется до 2 МэВ в двух следующих ВЧ-резонаторах. Электроны инжектируются на общую дорожку микротрона с помощью двух пар идентичных 65° поворотных магнитов с противоположными знаками. На выходе системы инжекции длина сгустка составляет 100 пс. Все пары ВЧ-резонаторов на общей дорожке расположены на расстоянии длины волны друг от друга.

Сепарирующий поворот для всех дорожек микротрона состоит из общего круглого магнита, квадрупольных линз и доворачивающих до 180° магнитов, для каждой дорожки свой магнит.

Данная магнитная система является ахроматичной, и ее вертикальная и горизонтальная оптические матрицы равны матрицам пустого промежутка. Разность длин орбит между последовательными дорожками микротрона составляет примерно одну длину волны ВЧ-системы. Выбор такого типа магнитной системы и ее ахроматичность позволяют проходить электронным сгусткам через ВЧ-резонаторы общей дорожки, уменьшить горизонтальный размер пучка и упростить согласование β -функций на семи изолированных дорожках с квадрупольными линзами.

Длина восьмой дорожки отличается от длины седьмой на 1,5 длины волны ВЧ-системы микротрона. После восьмикратного ускорения электроны, вновь попадая на общую дорожку, но теперь в замедляющей фазе, отдают свою энергию в ВЧ-систему. Далее электроны экстрагируются магнитами системы вывода (тождественными магнитам системы инжекции) и направляются в поглотитель.

Для обеспечения нужной фокусировки ускоряемого в замедляемого электронных пучков магнитная система (за исключением восьмой дорожки) зеркально симметрична относительно оси проходящей через центры прямолинейных промежутков. Согласованные β -функции имеют такую же симметрию.

Длина прямолинейных промежутков выбрана таким образом, что при инъекции электронных сгустков в каждый восьмой период напряжения ВЧ (т.е. с частотой 22,5 МГц) ускоряемые и замедляемые сгустки не перекрываются на общей дорожке. В этом случае взаимодействие электронных сгустков с различными энергиями значительно уменьшается.

Моделирование продольной и поперечной динамик электронов показало, что микротрон-рекуператор может работать в стабильном режиме при среднем токе выше 0,1 А. Окончательная группировка происходит на последней дорожке, что позволяет получить высокий пиковый ток (около 100 А) при сохранении малого поперечного эмиттанса пучка.

Для уменьшения эмиттанса и энергетического разброса мы планируем заменить термоэлектронную пушку на разрабатываемый в настоящее время фотоинжектор [10, 11].

2. ЛСЭ

Магнитная система ЛСЭ состоит из четырех ондуляторов, двух группирователей и ахроматического поворота. Первые три ондулятора и группирователи образуют оптический клистрон, используемый в качестве задающего генератора. Оптический резонатор длиной 79 м состоит из двух зеркал. Количество периодов в каждом ондуляторе равно 40, а длина периода — 9 см. Для облегчения настройки мы используем электромагнитные ондуляторы, что позволяет изменять коэффициент ондуляторности K от 1 до 2. Причина, по которой используются два группирователя, заключается в получении хорошей частотной селективности. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим обычный оптический клистрон, в котором максимум усиления соответствует условию $s = (n - 1/4)\lambda$ (λ — длина волны, n — целое, s — запаздывание электрона при движении от середины первого ондулятора до середины второго). В случае двух группирователей мы должны удовлетворить двум таким условиям одновременно (для различных s_1 и s_2), и поэтому максимумы будут существовать реже.

Данная конфигурация магнитной системы позволяет быструю и точную настройку длины волны. Необходимо подчеркнуть, что многоэлементная магнитная система задающего генератора оптимизирована на минимум внутррезонаторной мощности при достаточной группировке электронного пучка и малом энергетическом разбросе в четвертом ондуляторе (излучателе).

Магнитная система ахроматического поворота аналогична описанной и испытанной ранее [7, 8]. Учитывая угловые расходимости фундаментальной моды оптического резонатора и когерентного ондуляторного излучения, мы выбрали угол поворота равным 4 миллирадиана, при этом расстояние между центром зеркала и осью выходного излучения равно 14 см. Первоначально будет использоваться простейший оптический резонатор. Его большая длина позволяет уменьшить интенсивность света на поверхности зеркал и получить генерацию с малой частотой повторения (менее 2 МГц). Поэтому мы будем иметь малую среднюю мощность (и малый нагрев зеркал) при заданной пиковой мощности, что позволит сосредоточиться на тщательной настройке всех систем. После этого мы сможем увеличить выходную мощность увеличением частоты инжектируемых электронных сгустков.

Излучение ЛСЭ будет состоять из 10-30 пс импульсов с частотой повторения 2-22,5 МГц на длине волны 1-10 мкм. Изменяя энергию электронов от одного сгустка к другому с периодом, равным времени прохождения резонатора, мы можем модулировать длину волны.

В заключение необходимо подчеркнуть, что установка предназначена для удовлетворения требования пользователей Центра фотохимических исследований. Но наш подход позволяет обеспечить существенно большие мощности для других применений и, используя те же компоненты (ВЧ-генераторы, ускоряющие резонаторы, ондуляторы и т.д.), можно создать ЛСЭ с мегаваттной выходной мощностью.

Список литературы

- [1] R.H.Pantell. Comparisons between the FEL and the Conventional Laser. Nucl. Instr. and Meth., vol. A304, pp. 798-803, 1991.
- [2] O.Svelto. Principles of Lasers, New York. Plenum Press, 1976.
- [3] N.G.Gavrilov et al. Project of CW Race-Track Microtron-Recuperator for Free-Electron Laser. IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-27, pp. 2626-2628 December, 1991.
- [4] G.I.Erg et al. The Project of High Power Free-Electron Laser Using Race-Track Microtron-Recuperator. Budker Institute for Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia, Preprint 93-75, 1993.
- [5] T.I.Smith et al. Development of the SCA/FEL for Use in Biomedical and Material Science Experiments. Nucl. Instr. and Meth., vol. A259, pp. 1-7, 1987.
- [6] V.S.Arбузов et al. RF System of the Race-Track Microtron-Recuperator for FELs. In: BINP reports submitted to PAC-93". Novosibirsk, Preprint 93-58, 1993.
- [7] G.N.Kulipanov et al. In Mutual Coherency of Spontaneous Radiation from Two Undulators Separated by Achromatic Bend. IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-27, pp. 2566-2568. December, 1991.
- [8] N.G.Gavrilov et al. Observation of Mutual Coherence of Spontaneous Radiation from Two Undulators Separated by Achromatic Bend. IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-27, pp. 2569-2571. December, 1991.
- [9] A.S.Sokolov and N.A.Vinokurov. Computations of Longitudinal Electron Dynamics in the Recirculating cw RF Accelerator-Recuperator for the High Average Power FEL. Nucl. Instr. and Meth., vol. A341, pp. 398-401, 1994.
- [10] N.G.Gavrilov et al. Project of High Brightness Photoinjector for Free Electron Laser. Nucl. Instr. and Meth., vol. A331, pp. ABS17-ABS19m 1993.
- [11] N.G.Gavrilov et al. Project of CW Photoinjector for the High Power Free Electron Laser. To be published in the EPAC-94 Proceedings.
- [12] D.D.Quick, J.Blau, R.K.Wong, W.B.Colson. Phase Space Simulations of the Electron Bunching and Power output in the Novosibirsk/SELENE FEL. Nucl. Instr. and Meth., vol. A341, pp. ABS92-ABS93, 1994.
- [13] J.Blau, R.K.Wong, D.D.Quick, W.B.Colson. Three Dimensional Simulations of the Novosibirsk/SELENE FEL. Nucl. Instr. and Meth., vol. A341, p. ABS94, 1994.