

Первая очередь лазера на свободных электронах для Сибирского центра фотохимических исследований

Б.А. Баклаков, А.М. Батраков, В.П. Болотин, В.Ф. Веремеенко, Н.А. Винокуров, П.Д. Воблый, Н.Г. Гаврилов, Э.И. Горникер, Ю.А. Евтушенко, Н.И. Зиневич, Д.А. Кайран, В.В. Колмогоров, Е.И. Колобанов, А.А. Кондаков, С.А. Крутихин, В.В. Кубарев, Г.Н. Кулипанов, Э.А. Купер, И.В. Купцов, Г.Я. Куркин, Л.Э. Медведев, А.С. Медведко, Е.Г. Мигинская, С.В. Мигинский, Л.А. Мироненко, А.Д. Орешков, В.К. Овчар, В.М. Петров, С.П. Петров, В.М. Попик, И.К. Седяров, А.Н. Скринский, С.В. Тарарышкин, А.Г. Трибендис, М.А. Холопов, Т.В. Шафтан, О.А. Шевченко, Е.И. Шубин, М.А. Щеглов
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

Введение

Описываемый ЛСЭ – это мощная машина непрерывного действия ИК-диапазона. Ее планируемая средняя мощность достигает ~100 кВт. Так как эффективность ЛСЭ невелика и обычно не превышает нескольких процентов, идея рекуперации энергии электронов представляется весьма привлекательной. Более важный аргумент в пользу рекуперации – резкое снижение радиационного фона от машины. Это позволяет значительно облегчить радиационную защиту и, таким образом, снизить полную стоимость машины.

Один из известных методов рекуперации – вернуть отработанный электронный пучок в ВЧ-ускоряющую структуру, где он ускорился [1]. Такой режим работы ускорителя был продемонстрирован на Stanford NEPL [2]. Очевидное усовершенствование метода состоит в использовании многопроходного рециркулятора вместо простого линака.

Другая важная особенность машины – сравнительно низкая частота ускоряющего напряжения ВЧ. Это позволяет улучшить качество пучка и увеличить заряд в сгустке при прочих равных условиях. Оба фактора крайне важны при получении генерации ЛСЭ на малых длинах волн.

1. Полномасштабная машина

1.1. Ускоритель-рекуператор (УР)

Схема УР показана на Рис. 1. Электронный пучок из инжектора поступает через инжекционный канал в УР, проходит восемь раз через ускоряющую ВЧ-систему. Затем он направляется в структуру ЛСЭ, где отдает малую часть энергии в излучение, проходит еще восемь раз ускоряющую структуру в замедляющей фазе и уходит в поглотитель пучка с энергией инжекции.

Основные параметры УР следующие:

Машина:

Частота ВЧ-питания, МГц	180
Число ВЧ-резонаторов	16
Амплитуда ускоряющего напряжения на резонаторе, МВ	до 0.8
Общая мощность ВЧ, МВт	до 1.2
Энергия инжекции и экстракции (полная), МэВ	2

Ускоренный пучок:

Частота повторения, МГц	до 22.5
Средний электронный ток, мА	до 50
Энергия электронов, МэВ	до 100
Энергетический разброс (относительный)	10^{-3}
Длительность импульса, пс	10...20
Пиковый ток, А	100...200

Инжектор состоит из электронной пушки и трех ВЧ-резонаторов. Электронная пушка содержит катодно-сеточный узел, модулируемый управляемым генератором импульсов, и 300 кВ статическую ускоряющую трубку. Длительность сгустков на выходе пушки ≈ 1 нс. Один ВЧ-резонатор предназначен для группировки, два других – для ускорения пучка. Каждый сгусток получает время-коррелированный энергетический разброс в группирующем резонаторе и сжимается в дрейфовом промежутке между резонаторами. Затем он на-

бирает энергию в двух ускоряющих резонаторах. Одновременно частично компенсируется получает время-коррелированный энергетический разброс.

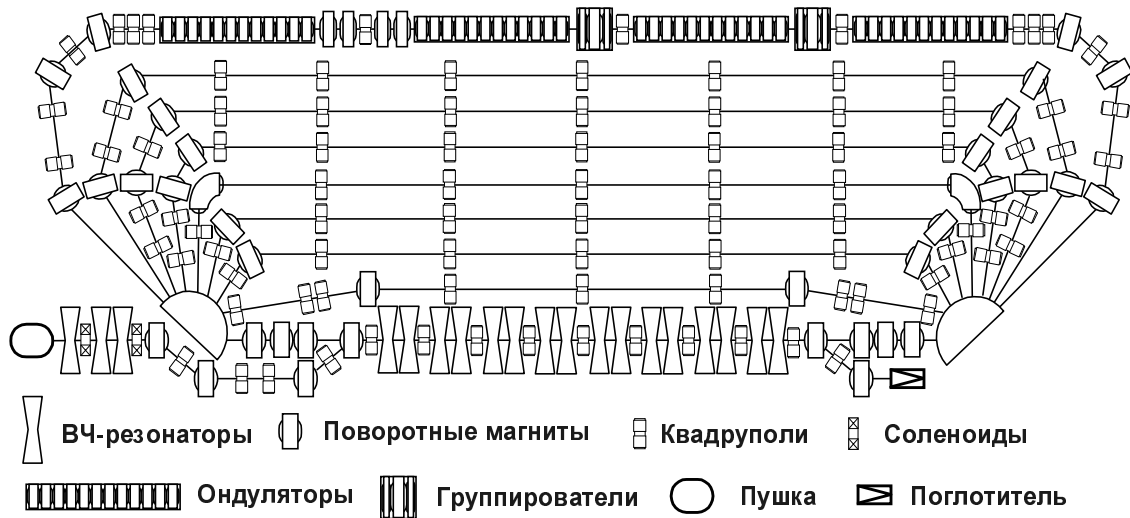


Рис. 1. Схема полномасштабного ускорителя-рекуператора и ИК ЛСЭ.

Длины всех дорожек УР, кроме последней, кратны длине волны ВЧ, как в обычном микротроне. Длина последней дорожки выбрана так, чтобы отработанный пучок инжектировался в устойчивую замедляющую фазу. Вследствие продольного фазового движения в УР вокруг равновесной траектории (вращения в продольной фазовой плоскости) ускоряемые сгустки группируются, их длительность уменьшается в 5–10 раз, а энергетический разброс возрастает.

1.2. ЛСЭ

Выбрана схема ЛСЭ с электронным выводом излучения [4]. ЛСЭ-генератор – это оптический клистрон с двумя ондуляторами, группирователем и двумя зеркалами. Сгруппированный в ЛСЭ-генераторе и ахроматическом повороте электронный пучок проходит через последний ондулятор и отдает часть своей энергии в когерентное ондуляторное излучение. Так как ось пучка в радиаторе отклонена от оси оптического резонатора, ондуляторное излучение минует зеркало резонатора. Главное достоинство такой схемы - многократное снижение мощности света внутри резонатора при прочих равных условиях.

Основные параметры ЛСЭ таковы:

Длина волны излучения, мкм	3...10
Длительность импульса, пс	10...100
Энергия в импульсе, Дж	до $5 \cdot 10^{-3}$
Частота повторения, МГц	2.25...22.5
Средняя мощность, кВт	до 100
Относительная ширина спектра излучения	$3 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3}$

1.3. Возможные применения

Машина предназначена для фундаментальных и прикладных исследований и промышленного применения.

♦ Физика:

- полупроводники – примесные уровни, возбужденные состояния, динамика рекомбинации;
- сверхпроводники – зоны проводимости, примеси;
- оптические отражающие поверхности и мономолекулярные слои;
- физика поверхности;
- транспортировка энергии на искусственные спутники Земли.

♦ Спектроскопия:

- вращательные и колебательные переходы в молекулах;
- диагностика зоны горения;
- лидар;
- калибровка ИК-детекторов.

♦ **Химия:**

- селективные реакции и разделение изотопов;
- динамика возбужденных состояний молекул;
- лазерный катализ;
- модификация поверхности полимеров.

♦ **Медицина:**

- микрохирургия;
- фототерапия;
- фотодинамическое разрушение опухолей.

2. Машина первой очереди

2.1. Ускоритель–рекуператор

Так как постройка полномасштабной машины требует много времени и ресурсов, представляется разумным разделить проект на два этапа. Машина первой очереди включает в себя УР с полномасштабной ВЧ-системой и только с одним оборотом пучка. Ее схема приведена на Рис. 2.

Важнейшие параметры УР первой очереди таковы:

Энергия инъекции и экстракции, МэВ	2 (полная)
Максимальная энергия электронов, МэВ	14
Средний ток пучка, мА	до 50
Частота ВЧ-питания, МГц	180
Длительность сгустков, пс	20...100
Пиковый ток, А	до 50

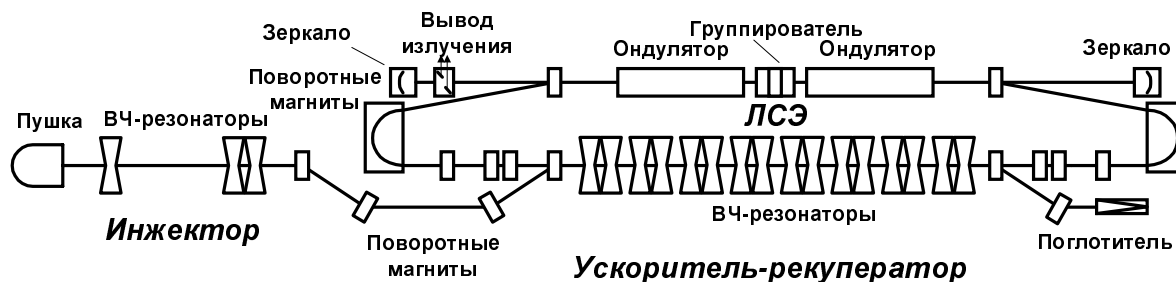


Рис. 2. Схема ускорителя-рекуператора первой очереди и субмиллиметрового ЛСЭ.

Необходимо отметить, что машина первой очереди расположена в вертикальной плоскости, в то время как полномасштабная – в горизонтальной. Таким образом, обе машины могут сосуществовать, хотя и не могут работать одновременно. Выбор между машинами осуществляется переключением поворотных магнитов, без переборки УР.

2.2. ЛСЭ

На единственную обратную дорожку УР первой очереди будет установлен субмиллиметровый ЛСЭ. Он состоит из двух ондуляторов, группирователя, двухзеркального оптического резонатора и устройства вывода излучения. Оба ондулятора одинаковы, плоские, электромагнитные, длиной 4 м, с периодом 120 мм, зазором 80 мм и параметром K до 0.8. Можно использовать один ондулятор или оба вместе с группирователем или без. Оба зеркала оптического резонатора одинаковые, медные, сферические, с водяным охлаждением. Устройство вывода излучения содержит два или четыре плоских медных зеркала. Эти зеркала отражают часть излучения с периферии собственной моды резонатора на выход. Такая схема сохраняет основную моду резонатора и уменьшает усиление на высших модах. Группирователь представляет собой трехполюсный электромагнитный вигглер.

Основные ожидаемые параметры ЛСЭ таковы:

Длина волны излучения, мкм	100...200
Длительность импульса, пс	20...100
Импульсная мощность, МВт	1...7
Средняя непрерывная мощность, кВт	0.6...7

Таким образом, по завершении первой очереди будет получен работающий ЛСЭ и, кроме того, уникальный стенд для отработки рекуперации и настройки ЛСЭ.

2.3. Возможные применения

Так как машина является уникальным источником излучения высокой средней мощности и может перестраиваться непрерывно в широком диапазоне, она может быть использована в различных фундаментальных и прикладных исследованиях.

◆ *ИК спектроскопия:*

- величина барьера вращательных колебаний молекул;
- водородные связи и системы с переносом заряда;
- неорганические комплексы;
- металлоорганические соединения;
- спектроскопия кристаллической решетки.

◆ *ЭПР спектроскопия:*

- некоторые спиновые системы, не наблюдаемые на более низких частотах, в частности $S = 1, 2, 3$, (такие как Ni(II) в катализаторах Fe(II) в протеинах), и $S = 3/2, 5/2, 7/2$ с сильным расщеплением в отсутствие поля (например, Co(II));
- системы с малой g-анизотропией, так что требуются крайне высокие поля, чтобы сдвиг линии был сопоставим с ее шириной;
- некоторые образцы, доступные лишь в очень малом количестве, так что для их исследования требуется экстремальная чувствительность (например, кристаллы протеинов);
- биомедицинские препараты с малой концентрации спиновой метки, что требует высокой чувствительности.

Выводы

- За прошедший год достигнут значительный прогресс в создании ЛСЭ [5]. Инжектор УР смонтирован, запущен и в настоящее время работает; ВЧ-система УР близка к завершению: большая часть ВЧ-резонаторов готова, остальные – в производстве, монтаж ВЧ-генераторов завершается, ВЧ-фидеры и система анодного питания изготавливаются; все остальные системы УР и ЛСЭ также запущены в производство.
- Представляется разумным разделить проект на два этапа, так чтобы работающую машину как можно скорее. Запуск первой очереди машины планируется в течение года.
- Обе машины – первой очереди и полномасштабная – будут сосуществовать одновременно.

Благодарность

Эта работа поддерживается грантом Сибирского отделения Российской академии наук 2000 - 86.

Литература

- [1] A.N.Skrinsky, N.A.Vinokurov. – Proceed. 6th Nat. Conf. on Charge Particle Acc., JINR, Dubna, 1979, p. 233.
- [2] T.I.Smith et al. Nucl. Instr. And Meth. A259 (1987), p.1.
- [3] R.E.Rand. Recirculating electron Accelerators, Harwood Academic Publishers, 1984.
- [4] G.N.Kulipanov et al. IEEE J. Quantum Electron., QE-27 (1991), p. 2566.
- [5] N.A.Vinokurov. – Proceed. AFEL'99, June 8-10, 1999, Taejon, Korea, p. 7.