

# 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. Купцов, 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. Шафтан,  
А.Н. Скринский, А.С. Соколов, В.Г. Вещеревич, П.Д. Воблый  
*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  $180^\circ$  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.

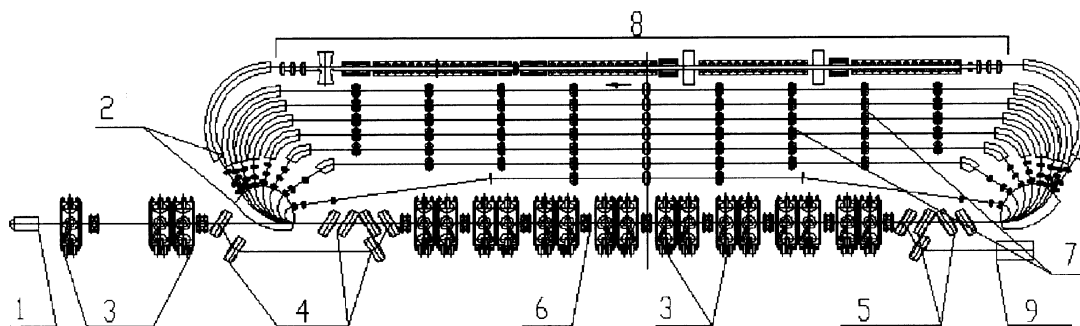


Рис. 1: Схема микротрона-рекуператора.

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  $65^\circ$  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  $180^\circ$  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  $\beta$ -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  $\beta$ -функции имеют такую же симметрию.

Длина прямолинейных промежутков выбрана таким образом, что при инжекции 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  $s = (n - 1/4)\lambda$  ( $\lambda$  — 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 предназначается 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.