

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ: ПРОБЛЕМЫ И СТАТУС

Н.А. Винокуров

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, 630090 Новосибирск

Рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) - это лазеры, использующие вынужденное ондуляторное излучение. Проекты таких ЛСЭ разрабатываются в SLAC (США) и DESY (Германия). Эти лазеры - просто очень длинные ондуляторы с электронным пучком, имеющим энергию 10 - 20 ГэВ, внутри них.

Электронный пучок, пролетающий через длинный ондулятор, неустойчив по отношению к периодической группировке на частоте основной гармоники спонтанного ондуляторного излучения. Поэтому начальные флуктуации плотности электронов экспоненциально нарастают вдоль ондулятора, и на некотором расстоянии от входа ондулятора электронный пучок оказывается почти полностью сгруппированным. Соответственно, вследствие группировки мощность излучения значительно растет. Таким образом, можно сказать, что очень длинный ондулятор нужен для получения периодически сгруппированного электронного пучка, который используется для генерации когерентного излучения в последней части ондулятора.

Замечательными свойствами излучения рентгеновского ЛСЭ являются малая длительность импульса (0,3 пс), высокая пиковая мощность (10 ГВт), узкая полоса (менее 10^{-3}) и полная поперечная когерентность (поперечная одномодовость).

Имеется два типа проблем, решение которых необходимо для создания рентгеновского ЛСЭ. Первый - это высокие требования, предъявляемые к параметрам электронного пучка. Эмиттанс не должен существенно превышать длину волны, деленную на 4π (10^{-11} м). Кроме того, желательны пиковый ток порядка нескольких килоампер и относительный энергетический разброс порядка 10^{-4} . Второй - жесткие допуски на параметры магнитной системы ЛСЭ, включая ошибки поля ондуляторов и ошибки выставки ондуляторов и квадрупольных линз. Требования обеих групп превышают достигнутый сейчас уровень, однако, ведутся работы, направленные на их выполнение.

Николай Александрович Винокуров vinokurov@inp.nsk.su

X-RAY FEL: PROBLEMS AND STATUS

N.A. Vinokurov

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

X-ray free electron lasers (FELs) are the lasers based on the stimulated undulator radiation. The projects of such lasers are under development at SLAC (USA) and DESY (Germany). These FELs are just very long (150 - 250 m) undulators with 10 - 20 GeV electron beam inside.

An electron beam, propagating through a long undulator is unstable with respect to the periodic bunching at the frequency of the fundamental harmonics of spontaneous undulator radiation. Therefore the initial fluctuations of electron density grow exponentially along the undulator, and at some distance from the undulator entrance the electron beam is bunched almost fully. Correspondingly, the radiation power is enhanced significantly due to the beam bunching. Thus, one can say, that we need very long undulator to obtain the periodically bunched electron beam, and we use the last one to generate the coherent undulator radiation at the last part of the undulator.

The remarkable features of the X-ray FEL radiation are the short pulse duration (0.3 ps), high peak power (10 GW), narrow bandwidth (less than 10^{-3}) and full transverse coherence (single transverse mode).

There are two kinds of problems to be solved for creation of an X-ray FEL. First is the hard requirements for the electron beam parameters. Emittance have not to exceed the wavelength divided

to 4π (10^{-11} m) significantly. Also, the several-kiloampere peak current and 10^{-4} relative energy spread are desirable. Second is the tight tolerances for the parameters of the FEL magnetic system, including the undulator field errors, and alignment of undulators and focusing quadrupoles. Both groups of requirements are beyond a contemporary state of art, but extensive developments are being performed to meet them.

Nikolai Vinikurov vinokurov@inp.nsk.su

3-90

СТАТУС 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, А.К.Петров*, В.М.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, 630090 Новосибирск, Россия

**Институт химической кинетики и горения, Новосибирск, Россия*

Полномасштабный проект мощного лазера на свободных электронах (ЛСЭ) для Сибирского центра фотохимических исследований предусматривает постройку восьмиоборотного 100-МэВ ускорителя-рекуператора (УР) [1], [2], Рис. 1. В этом случае ЛСЭ будет обеспечивать следующие параметры:

Длина волны излучения, мкм		3...10
Длительность импульса, пс		10...100
Энергия в импульсе, Дж	до	$5 \cdot 10^{-4}$
Частота повторения, МГц		2.25...22.5
Средняя мощность, кВт	до	10
Относительная ширина спектра излучения		$3 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3}$

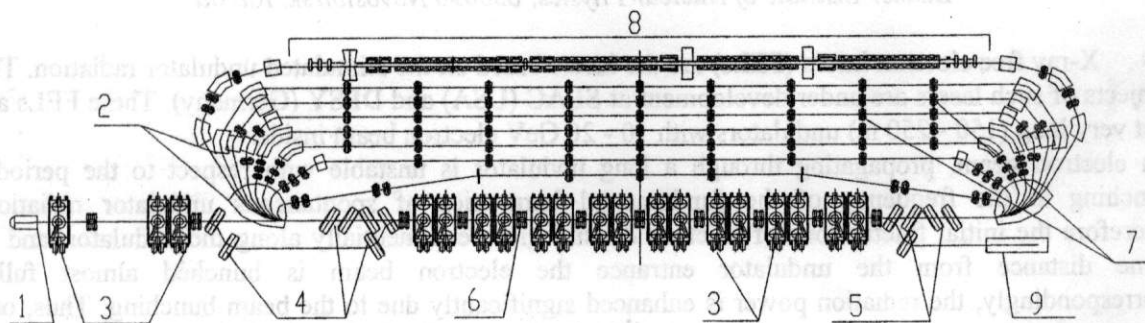


Рис. 1. Схема лазера на свободных электронах на основе ускорителя-рекуператора. 1 - электронная пушка, 2 - поворотные магниты, 3 - ВЧ-резонаторы, 4 - впускные магниты, 5 - выпускные магниты, 6 и 7 - квадрупольные линзы на общей и отдельных дорожках, 8 - магнитная система ЛСЭ, 9 - поглотитель отработанного электронного пучка.

Машина предназначена для фундаментальных и прикладных исследований и технологических применений:

◆ Физика:

- полупроводники - примесные уровни, возбуждение, рекомбинационная динамика;
- сверхпроводимость - примеси;
- оптические отражающие поверхности и мономолекулярные слои;
- физика поверхности;
- передача энергии на искусственные спутники.

◆ Спектроскопия:

- молекулярные вращательные и колебательные переходы;
- диагностика зоны горения;
- лидар;
- калибровка детекторов ИК - излучения.

◆ Химия:

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

◆ Медицина:

- микрохирургия;
- фототерапия;
- фотодинамическое разрушение опухолей.

Поскольку создание полномасштабной машины требует значительного времени и ресурсов, было принято решение разбить проект на два этапа. Первая очередь машины включает в себя УР с полномасштабной ВЧ-системой и только одним оборотом пучка. Важнейшие параметры УР первой очереди таковы:

Энергия инжекции и экстракции, МэВ		2 (полная)
Максимальная энергия электронов, МэВ		14
Средний ток пучка, мА	до	50
Частота ВЧ-питания, МГц		181
Длительность сгустков в пучке, пс		20...100
Пиковый ток, А	до	50

На единственную обратную дорожку УР будет установлен ЛСЭ субмиллиметрового диапазона. ЛСЭ состоит из двух ондуляторов, группирователя, оптического резонатора с двумя зеркалами и устройства вывода излучения (Рис. 2). Оба ондулятора - одинаковые, плоские электромагнитные, длиной 4 м каждый, с периодом 120 мм, зазором 80 мм и К до 0.8. Может быть использован один из ондуляторов или оба вместе, в последнем случае может быть включен или отключен группирователь. Оба зеркала - одинаковые, сферические, медные, охлаждаемые водой. В выводе излучения использованы два или четыре плоских медных зеркала. Зеркала отклоняют часть излучения с периферии резонаторной моды. Такая схема подавляет генерацию высших мод. Группирователь представляет собой электромагнитный трехполосный вигглер.

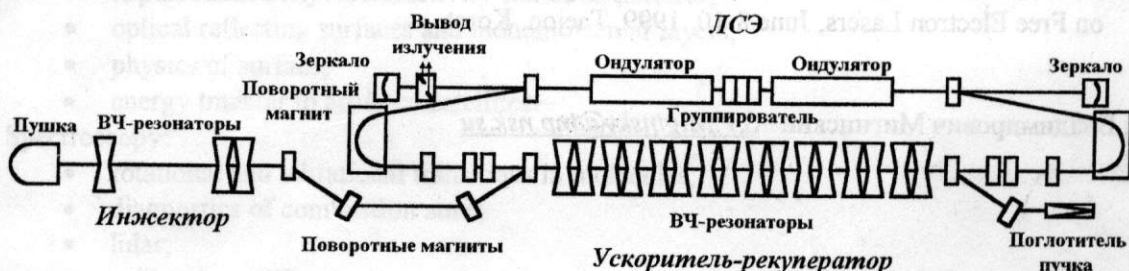


Рис. 2.. Схема 14-МэВ ускорителя-рекуператора и субмиллиметрового ЛСЭ.

Основные параметры ЛСЭ могут быть оценены как

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

Таким образом, по завершении первой очереди проекта будет получен работающий ЛСЭ. Кроме того, появится уникальный полигон для отработки технологий рекуперации энергии пучка и настройки ЛСЭ. Наконец, так как данная машина является уникальным источником излучения с большим непрерывным диапазоном перестройки и высокой средней мощностью, имеются широкие возможности применения субмиллиметрового ЛСЭ в прикладных и фундаментальных исследованиях:

◆ ИК спектроскопия:

- внутримолекулярные вращательно-колебательные степени свободы;
- водородные связи и системы с передачей заряда;
- неорганические комплексы;
- металорганические соединения;
- спектроскопия кристаллических решеток.

◆ ЭПР-спектроскопия

- некоторые спиновые системы, не исследуемые на более низких частотах, например, $S = 1, 2, 3...$ (Ni (II) в катализаторах, Fe (II) в протеинах) или $S = 3/2, 5/2, 7/2...$ с большим расщеплением в нулевом поле (Co (II));
- системы с малой g-анизотропией, так что требуются весьма высокие поля для разрешения спектра;
- образцы, доступные лишь в очень малых количествах, так что требуется экстремально высокая чувствительность аппаратуры;
- биомедицинские препараты с малой молярной концентрацией исследуемого вещества.

В настоящее время полностью проведена реконструкция здания, где размещается машина; инжектор УР запущен, отлажен и находится в рабочем состоянии; ВЧ-система УР близка к завершению: более половины ВЧ-резонаторов готовы к применению, остальные находятся в производстве, заканчивается монтаж ВЧ-генераторов, запущены в производство волноводные узлы системы ВЧ-питания и анодного питания ВЧ-генераторов; все остальные системы ЛСЭ и УР также находятся в производстве. Итак, состояние дел позволяет надеяться на пуск всей установки в течение года.

Литература:

- [1] Vinokurov N.A., Gavrilov N.G., Gorniker E.I., et al. The project of high power free electron laser using race-track microtron-recuperator. Proc. EPAC-94, London, Great Britain, 1 (1994), 858.
- [2] N.A. Vinokurov. Status of the Novosibirsk high power FEL (oral). 4-th Asian Symposium on Free Electron Lasers, June 8-10, 1999, Taejon, Korea.

Сергей Владимирович Мигинский S.V.Miginsky@inp.nsk.su

STATUS OF THE FREE ELECTRON LASER FOR THE SIBERIAN CENTRE FOR PHOTOCHEMICAL RESEARCH

B.A.Baklakov, A.M.Batrakov, V.P.Bolotin, Y.A.Evtushenko, N.G.Gavrilov, E.I.Gorniker,
D.A.Kairan, M.A.Kholopov, V.V.Kolmogorov, E.I.Kolobanov, A.A.Kondakov, S.A.Krutikhin,
V.V.Kubarev, G.N.Kulipanov, E.A.Kuper, I.V.Kuptsov, G.Ya.Kurkin, L.E.Medvedev,
A.S.Medvedko, E.G.Miginsky, S.V.Miginsky, L.A.Mironenko, A.D.Oreshkov, V.K.Ovchar,
V.M.Petrov, A.K.Petrov*, V.M.Popik, I.K.Sedlyarov, T.V.Shaftan, M.A.Scheglov,
O.A.Shevchenko, E.I.Shubin, A.N.Skrinsky, S.V.Tararyshkin, A.G.Tribendis, V.F.Veremeenko,
N.A.Vinokurov, P.D.Vobly, N.I.Zinevich

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

**Institute of Chemical Kinetics and Combustion, 630090 Novosibirsk, Russia*

The full-scale project of high-power free electron laser (FEL) for the Siberian Centre for Photochemical Research incorporates an eight-turns 100-MeV accelerator-recuperator (AR) [1], [2], Fig. 1. In this case the FEL will provide the following parameters:

Wavelength of emitted radiation, μm		3...10
Pulse duration, ps		10...100
Pulse energy, J	up to	$5 \cdot 10^{-4}$
Repetition rate, MHz		2.25...22.5
Average power, kW	up to	10
Relative bandwidth of emission spectrum		$3 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3}$

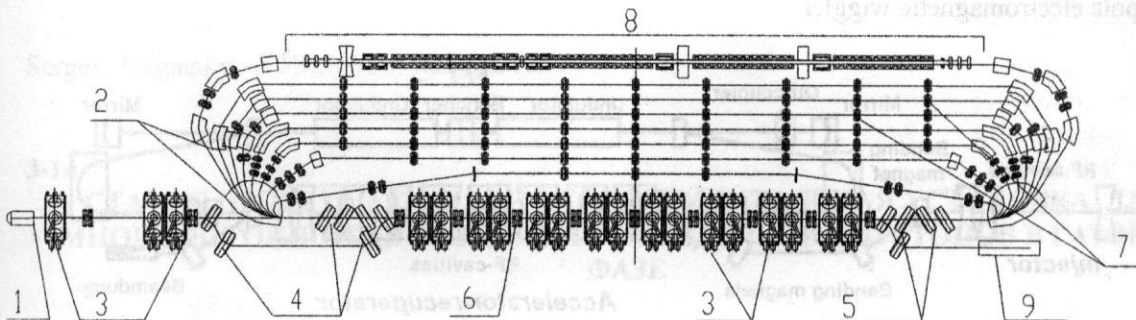


Fig. 1. Schematic drawing of the free electron laser driven by an accelerator-recuperator. 1 - electron gun, 2 - bending magnets, 3 - RF-cavities, 4 - injection magnets, 5 - extraction magnets, 6 and 7 - quadrupole lenses on the common and separate tracks, 8 - magnet system of the FEL, 9 - beam dump.

The machine is intended for basic and applied research and industrial purposes:

◆ **Physics:**

- semiconductors - admixture levels, excitation, dynamics of recombination;
- superconductivity - conductivity zones, admixtures;
- optical reflecting surfaces and monomolecular layers;
- physics of surface;
- energy transfer to artificial satellites.

◆ **Spectroscopy:**

- rotational and vibrational transitions in molecules;
- diagnostics of combustion zone;
- lidar;
- calibration of IR-sensors.

◆ **Chemistry:**

- selective reactions and isotope separation;

- dynamics of molecular excitation;
- laser catalysis;
- modification of surfaces of polymers.

◆ Medicine:

- microsurgery;
- phototherapy;
- photodynamic destruction of tumours.

As building up the full-scale machine takes a long time and much resources, it is reasonably to divide the project into two stages. The first-stage machine includes the AR with the full-scale RF-system and only one turn of electron beam. Most important parameters of the first-stage AR are:

Energy of injection and extraction, MeV		2 (full)
Maximum electron energy, MeV		14
Average beam current, mA	up to	50
Accelerating RF-frequency, MHz		181
Bunch duration, ps		20...100
Peak current, A	up to	50

A submillimeter-wave FEL will be installed on the single backward track of the AR. The FEL consists of two undulators, a buncher, two mirrors of optical resonator, and an outcoupler (see Fig. 2). Both undulators are identical. They are electromagnetic planar ones, of length 4 m, period 120 mm, gap 80 mm, and K up to 0.8. One can use one or both undulators with or without the buncher. Both mirrors are identical, spherical, made of polished copper, and water cooled. The outcoupler contains two or four adjustable planar copper mirrors. These mirrors scrape radiation inside the optical resonator and redirect a small part of it to the consumer. This scheme preserves the main mode of the optical resonator well and reduces amplification of higher modes effectively. The buncher is simply a three-pole electromagnetic wiggler.

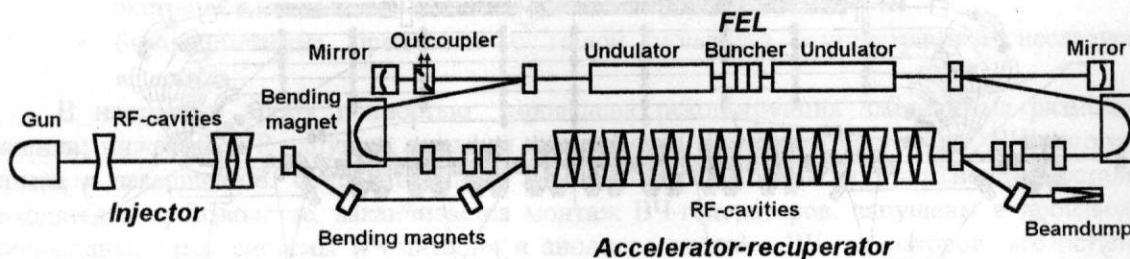


Fig. 2. Schematic drawing of the 14-MeV accelerator-recuperator and the submillimeter FEL.

Basic parameters of the FEL can be estimated as:

Wavelength of emitted radiation, μm	100...200
Pulse duration, ps	20...100
Peak power, MW	1...7
Average power, kW	0.6...7

Thus, one gets an operating FEL after commissioning the first stage of the project. In addition, a unique testing area to work up the technique of recuperation of beam energy and adjustment procedure of the FEL. Finally, as the machine is a unique source of radiation of high average power and can be tuned continuously in a broad band, it can be used in various basic and applied researches:

◆ IR spectroscopy:

- barriers of the internal rotations in molecules and torsion vibrations;
- hydrogen bonds and systems with the charge transfer;
- inorganic complexes;
- metalorganic compounds;

- crystalline lattice spectroscopy.
- ◆ Electron paramagnetic resonance spectroscopy:
 - some spin systems, that can not be observed at lower frequencies at all; these include, for example $S = 1, 2, 3$, (such as Ni(II) in catalysts and Fe(II) in proteins), and $S = 3/2, 5/2, 7/2$ with large zero-field splitting (e.g. Co(II));
 - systems with small g-anisotropy, that requires extremely high fields to make the spectral dispersion significant relative to line width;
 - some samples available only as small crystals or fibers, so very high sensitivity is needed to study them (examples include protein crystals);
 - small molar spin concentration in biomedical samples, that claims high sensitivity.

Recently, necessary reconstruction of the accelerator building was accomplished; the injector for the AR was assembled, adjusted and commissioned and is in operation now; the RF-system of the AR is nearing completion: most part of RF-cavities are ready for using, others are in manufacturing, assembling of RF-generators will be completed soon, RF-feeding and anode PS systems were put into production; all other systems of the FEL and the AR are manufacturing too. So then, according to the current situation one can expect the machine to be started up during an year.

References:

- [1] Vinokurov N.A., Gavrilov N.G., Gorniker E.I., et al. The project of high power free electron laser using race-track microtron-recuperator. Proc. EPAC-94, London, Great Britain, 1 (1994), 858.
- [2] N.A. Vinokurov. Status of the Novosibirsk high power FEL (oral). 4-th Asian Symposium on Free Electron Lasers, June 8-10, 1999, Taejon, Korea.

Sergey Miginsky *S.V.Miginsky@inp.nsk.su*

3-14

СТАТУС ПРОЕКТА FEL-SUT, И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МНОГОФОТОННОЙ ДИССОЦИАЦИИ И РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

А.В. Чернышев^{1,2}, К. Nomaru^{1,3}, А.К. Петров², М. Kawai^{1,3}, К. Toyoda¹, К. Nakai¹
и Н. Kuroda¹

1 - IR FEL Research Center, Research Institute for Science and Technology, Science University of Tokyo, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510, Japan

2 - Институт Химической Кинетики и Горения, Институтская 3, Новосибирск 630090, Россия

3 - Kanto Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries Ltd., 118 Futatsuzuka, Noda, Chiba 278-8585, Japan

Лазер на свободных электронах среднего инфракрасного диапазона (MIR FEL) Токийского Научного Университета (SUT) MIR FEL-SUT [1,2] в настоящее время проходит заключительные испытания, и пуск его в эксплуатацию планируется на лето 2000. Создание ЛСЭ дальнего ИК диапазона FIR FEL-SUT начнется с осени 2000. Построенный на основе MIR FEL-SUT в апреле 1999 года Исследовательский Центр (IR FEL-SUT Research Center) принадлежит Научно-Технологическому Институту Токийского Научного Университета (Institute for Science and Technology of the Science University of Tokyo) и расположен на территории отделения Университета в городе Нода (Noda Campus).

Главной задачей Центра является разработка новых приложений ИК ЛСЭ в физике, химии, технологии материалов, биотехнологии, медицине и пр. В проектировании MIR FEL-SUT учтены требования потенциальных пользователей. ЛСЭ был сконструирован с целью иметь определенные параметры импульсов и диапазон перестройки длины волны, быть