

## Состояние дел и перспективы лазера на свободных электронах Сибирского центра фотохимических исследований

Н.А.Винокуров

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск*  
e-mail: vinokurov@inp.nsk.su

### Аннотация

В последнее десятилетие во всем мире расширяются исследования с использованием электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН создан самый мощный в мире источник такого излучения – лазер на свободных электронах (ЛСЭ) на ускорителе-рекуператоре. Он дает излучение со средней мощностью до 400 Вт в диапазоне длин волн 120 – 200 микрон. Для продвижения в более высокочастотную часть терагерцового диапазона создается вторая очередь ЛСЭ.

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) (см. [1 – 4]) позволяют получать монохроматическое излучение на любой заданной длине волны. В настоящее время в мире ведутся интенсивные работы по созданию мощных ЛСЭ [5 – 7]. Проблему составляет также относительно широкая линия генерации (обычно порядка 1%). Для создания промышленных фотохимических технологий требуется достичь уровня средней мощности ~ 10 кВт и монохроматичности не хуже нескольких сотых процента.



Рис. 1. Фотография первой очереди ЛСЭ.

В настоящее время в ИЯФ ведется строительство мощного ЛСЭ. В основе своей полномасштабный мощный лазер на свободных электронах будет иметь многодорожечный ускоритель-рекуператор (УР) с максимальной энергией 40 МэВ. Ожидаемый диапазон длин волн излучения полномасштабного ЛСЭ - от 5 до 300 микрон.

В 2003 году Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН при участии Института химической кинетики и горения СО РАН запущена первая очередь лазера на свободных электронах (ЛСЭ) Сибирского центра фотохимических исследований (Рис. 1) [8, 9]. Схема установки показана на Рис. 2. ЛСЭ первой очереди установлен на однооборотном ускорителе-рекуператоре на энергию 12 МэВ с полномасштабной высокочастотной системой и упрощенной магнитной системой.

Новосибирский ЛСЭ является самым мощным (по средней мощности) в мире источником субмиллиметрового (терагерцового) монохроматического излучения. Это позволяет надеяться, что с его помощью можно проводить уникальные исследования по физике, химии, биологии и др. отраслям науки.

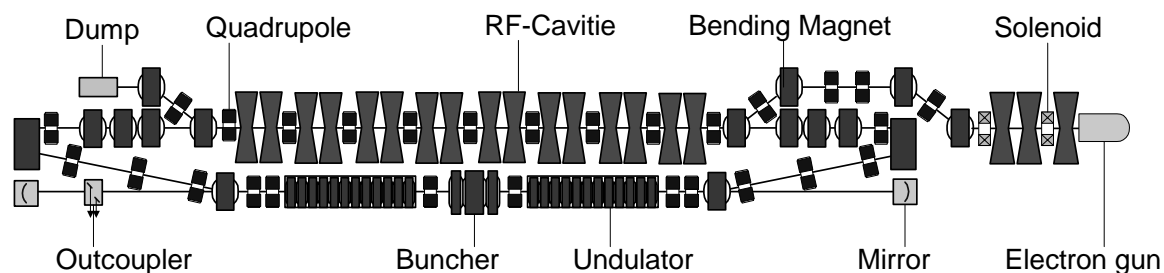


Рис. 2. Схема первой очереди Новосибирского ЛСЭ.

В течение 2005 года работы велись в трех направлениях – (1) улучшение параметров и повышение надежности работы ускорителя-рекуператора с лазерной системой, (2) вывод лазерного излучения к пользовательским станциям и выполнение первых экспериментов с использованием терагерцового излучения и (3) проектирование второй очереди ускорителя-рекуператора и ЛСЭ.

Достигнутые к настоящему времени параметры ускорителя-рекуператора и лазера на свободных электронах приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры лазера на свободных электронах.

Энергия электронного пучка, МэВ	12
Частота ВЧ-системы, МГц	180,4
Частота следования сгустков, МГц	11,75
Средний ток, мА	20
Максимальная средняя выводимая мощность лазерного излучения, Вт	400
Диапазон перестройки длин волн, мкм	120-235
Ширина спектра излучения $\Delta\lambda/\lambda$ , (минимальная)	3·10 <sup>-3</sup>
Эффективность рекуперации, %	>95

Проведена оптимизация параметров магнитной системы ускорителя, позволившая существенно поднять выходную мощность. Улучшена компенсация искажения траектории полем ондуляторов. За счет этого расширен диапазон перестройки длины волны (120 – 235 микрон). Отработан режим быстрой перестройки длины волны с одновременным изменением поля в ондуляторах, квадрупольных линзах и корректорах.

Собран канал вывода излучения из зала ускорителя к станциям пользователей и четыре станции (см. Рис. 3, 4). Продолжены эксперименты с абляцией различных образцов, включая биологические.



Рис. 3. Канал в зале для пользователей. Видны спуски к экспериментальным станциям.



Рис. 4. Экспериментальные станции.

Полномасштабный УР использует ту же ускоряющую ВЧ-структуру, что и УР первой очереди, но расположен, в отличие от последнего, в горизонтальной плоскости (см. Рис. 5). Таким образом, не требуется демонтаж одного для постройки другого. Выбор режима работы осуществляется простым переключением поворотных магнитов. Полномасштабный УР построен по схеме разрезного микротрона, причем рекуперация энергии электронного пучка происходит по той же схеме, что и ускорение, но фазы пролета ускоряющей структуры отображаются зеркально. Основные проектные параметры полномасштабного УР следующие:

Энергия инъекции полная, МэВ	2;
Максимальная энергия пучка, МэВ	40;
Максимальная частота повторения, МГц	90;
Максимальный средний ток пучка, мА	150.

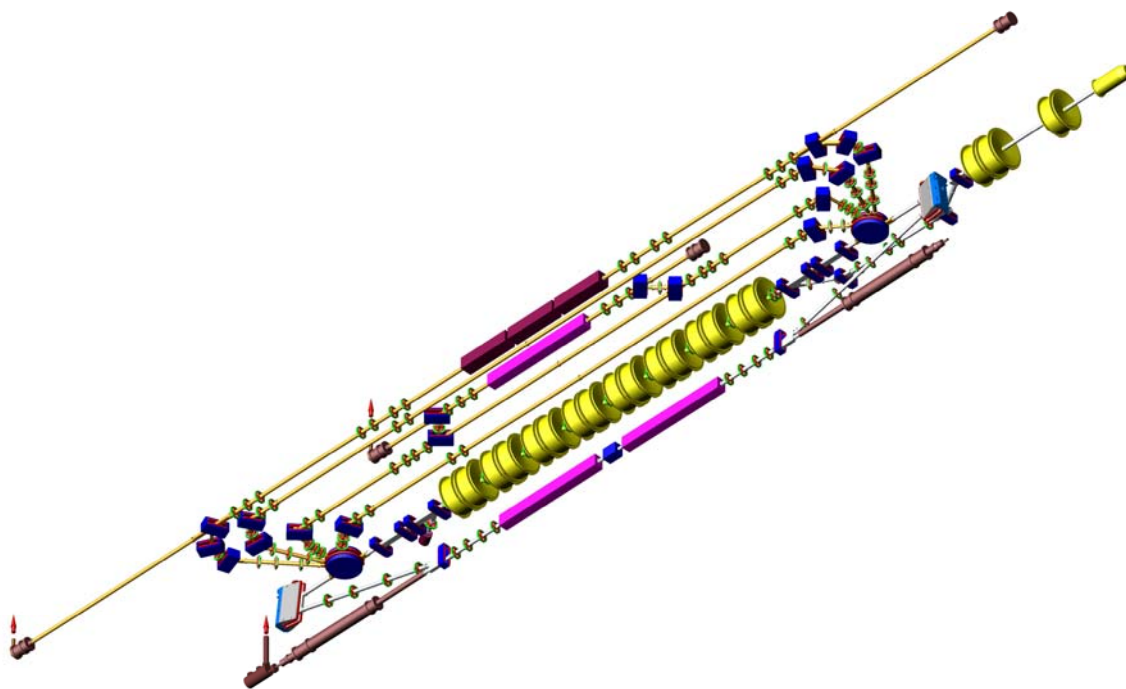


Рис. 5. Общий вид магнитной системы ускорителя-рекуператора второй очереди.

В дальнейшем планируется установить на последнюю (40 МэВ) дорожку УР мощный ЛСЭ ближнего ИК диапазона в области длин волн 5 – 12 мкм, а на вторую дорожку (байпас) еще один ЛСЭ с диапазоном 40 – 100 мкм. Ожидаемая средняя мощность каждо-

го ЛСЭ – 10 кВт.

ЛСЭ второй дорожки установлен на байпасе. Если магниты байпаса выключены, то пучок проходит вдоль оси второй дорожки и продолжает ускоряться. Если же магниты включены, то пучок проходит через ЛСЭ второй дорожки. Длина траектории в этом случае на 66 см больше, поэтому «отработанный» пучок приходит в высокочастотные резонаторы УР позже и замедляется. Для ЛСЭ второй дорожки была выбрана схема, близкая к ЛСЭ первой очереди. Период ондулятора  $d = 120$  мм - выбран с учетом энергии электронов (15 – 20 МэВ) и диапазона перестройки длины волны излучения (40 – 100 микрон). Полная длина ондулятора – около 4 м. Она ограничена из-за механических проблем (жесткости и трудности изготовления длинного магнитопровода с требуемой точностью).

На основании численного решения уравнений для усиления слабого сигнала проведен расчет усиления в таком ЛСЭ при разных параметрах основной моды оптического резонатора. Усиление должно превышать потери в оптическом резонаторе, которые зависят от коэффициента отражения зеркал. Многослойные диэлектрические зеркала имеют высокие значения коэффициента отражения, но узкополосны и могут не выдержать большой (порядка 100 кВт) средней мощности в оптическом резонаторе, поэтому в настоящее время предполагается использовать медные зеркала с золотым покрытием.

Разработана программа, моделирующая работу ЛСЭ с относительно короткими электронными сгустками. После завершения проверки работы программ была проведена оптимизация оптической системы для второй очереди ЛСЭ.

Расчетная средняя мощность излучения превышает 1 кВт при относительной ширине линии менее 1% и пиковой мощности несколько МВт.

При длине ондулятора  $L_u = 4$  м, получим минимальную апертуру вакуумной камеры ондулятора  $2\sqrt{\lambda L_u}$ . Для максимальной длины волны 100 микрон это составит 40 мм. С учетом увеличенной длины Рэлея, а также для снижения требований к точности геодезической выставки элементов вакуумной камеры, была выбрана апертура 60 мм, а зазор между полюсами ондулятора – 70 мм.

Так как период ондулятора довольно велик, то можно применить электромагнитную конструкцию. Расчеты поля были проведены с использованием программы MERMAID, разработанной в ИЯФ. Они позволили выбрать ширину полюсов, при которой амплитуда поля мало отличается от случая бесконечной ширины.

Серьезной проблемой является сильная вертикальная фокусировка в ондуляторе. Фокусировка может быть количественно охарактеризована величиной согласованной бета функции  $\beta = \gamma d / \sqrt{2\pi K}$ .

Для энергии  $E = 20$  МэВ и параметра ондуляторности  $K = 1$   $\beta = 0.5$  м. Несколько усложнив конструкцию ондулятора можно обеспечить увеличение  $\beta$  в 1.5–2 раза и получить горизонтальную фокусировку. Численные расчеты поля в модифицированном ондуляторе позволили найти оптимальную форму полюсов (см. прилагаемый чертеж). Эта форма обеспечивает одинаковую фокусировку по вертикали и по горизонтали, а также минимальную нелинейность фокусировки.

Для зануления первого и второго интегралов вертикального поля на концах ондулятора зазор в первых двух и последних двух парах полюсов может изменяться при помощи вертикального смещения полюсов. Кроме того, первые и последние полюса охвачены одним витком тока, а не двумя, как все остальные полюса. На каждом краю ондулятора установлено по два корректора, создающих вертикальное магнитное поле.

По заданной длине ондулятора (4 м) можно сразу найти "оптимальную" длину Рэлея для оптического резонатора – 2 м. Такая длина Рэлея обеспечивает минимальные поперечные размеры основной моды оптического резонатора на концах вакуумной камеры ондулятора.

Полная длина оптического резонатора (т.е., расстояние между его зеркалами)  $L$  определяется из условия синхронизации продольных мод  $2L/c = n/f_0$ , где  $c$  – скорость света,  $f_0$  – частота следования электронных сгустков,  $n$  – целое число. Для существующей электронной пушки ускорителя-рекуператора  $f_0 = 22.5$  МГц, поэтому

$$L = n \cdot 6647 \text{ мм}.$$

Для снижения интенсивности излучения на поверхности зеркал оптического резонатора следует выбрать максимальную длину резонатора. Поэтому была выбрана максимальная доступная длина 20 м.

Схема оптимизированного оптического резонатора показана на Рис. 6. Она близка к схеме уже существующего резонатора ЛСЭ на 1-3 ТГц [10].

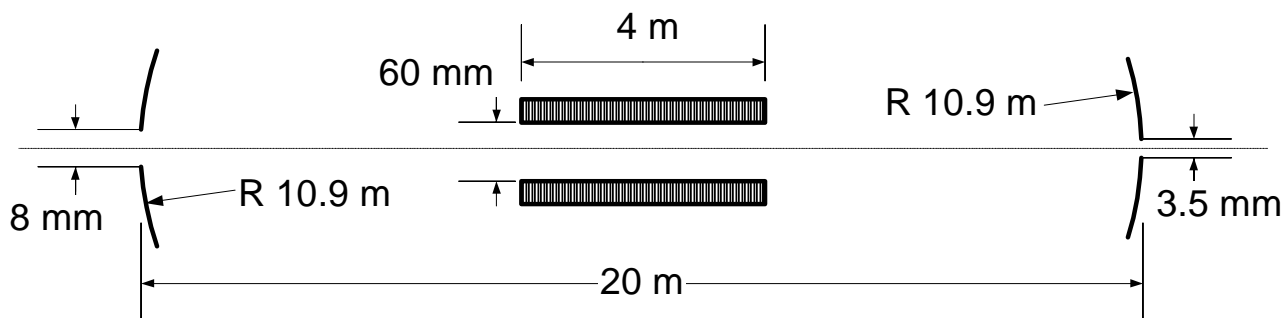


Рис. 6. Схема оптического резонатора.

Серьезной проблемой является изменение радиуса кривизны зеркал вследствие их нагрева излучением. Для расчета этого эффекта была создана специальная программа. С ее помощью ведется оптимизация толщины зеркала и формы охлаждающих деталей.

#### Литература

1. Murphy J.B., Pellegrini C. Introduction to the physics of the free electron laser. Laser handbook, vol. 6, p. 9. North-Holland, Amsterdam, 1990.
2. Маршалл Т.С. Лазеры на свободных электронах. - М.: Мир, 1987.
3. Агафонов А.В., Лебедев А.Н. Лазеры на свободных электронах. - М.: Знание, 1987.
4. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах / Сб. статей под ред. А.А. Рухадзе. - М.: Мир, 1983.
5. Gavrilov N.G. et al., IEEE J. Quantum Electron., QE-27, p. 2626, 1991.
6. Neil G. R. et al., Phys. Rev. Lett. 84 (2000), p. 662.
7. Minehara E.J., Nucl. Instr. and Meth. A, V. 483, p. 8, 2002.
8. Antokhin E.A., Akberdin R.R., Arbuzov V.S. et al. First experimental results obtained using the high-power free electron laser at the Siberian center for photochemical research // Problems of atomic science and technology. – 2004. No 1. – P. 3-5.
9. Antokhin E.A., Akberdin R.R., Arbuzov V.S. et al. First lasing at the high-power free electron laser at Siberian center for photochemical research // Nuclear instruments and methods in physics research. Sec. A. – 2004. – Vol. A528, No 1/2. – P. 15. –18.
10. Kubarev V.V., Persov B.Z., Vinokurov N.A., Davidov A.V. Optical resonator of powerful free-electron laser // Nuclear instruments and methods in physics research. Sec. A. – 2004. – Vol. A528, No 1/2. – P. 199-202.

## Источники терагерцового излучения на электронных пучках и эксперименты с их применением (обзор)

Б. А Князев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск  
e-mail: knyazev@inp.nsk.su

### Аннотация

Приведен краткий обзор источников терагерцового излучения, основанных на излучении релятивистских электронов. Обзор выполнен по материалам докладов, представленных на конференции Joint 30<sup>th</sup> Intl. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13<sup>th</sup> Intl. Conf. on Terahertz Electronics, Williamsburg, USA, September 19 – September 23, 2005, p. 405, с добавлением некоторых материалов из недавних журнальных публикаций. Основное внимание уделено использованию терагерцового излучения лазеров на свободных электронах.

Можно выделить три основных типа генераторов излучения, использующих излучение релятивистских электронов. Прежде всего, это – синхротроны, излучение которых используется в прикладных целях в течение уже нескольких десятилетий. «Классический период» использования синхротронного излучения (СИ) описан в обзоре [1]. За прошедшее время применение синхротронного излучения позволило получить уникальные результаты в самых различных областях науки, что подтверждает многолетний опыт функционирования Центра синхротронного излучения в ИЯФ им. Г. И. Будкера. Источники синхротронного излучения генерируют широкополосное излучение при движении в магнитном поле. Однако интенсивность их излучения в терагерцовом диапазоне длин волн до недавних пор была относительно невелика (см. рис. 1). По этой причине исследований в терагерцовом диапазоне с их помощью не проводилось.

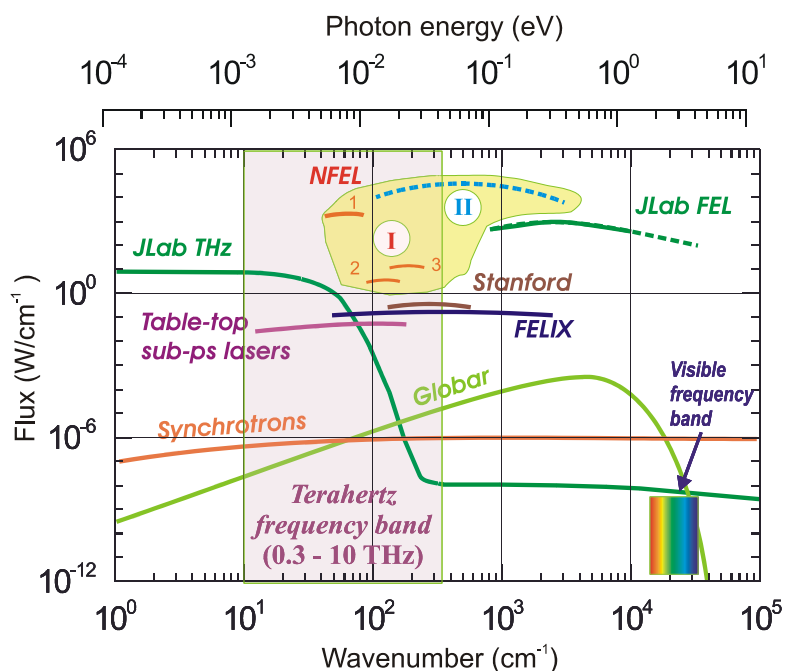


Рис. 1. Спектральная плотность излучения некоторых источников в терагерцовом и соседних диапазонах, в том числе лазеров на свободных электронах Джефферсоновской лаборатории (JLab FEL), Стэнфордского университета (Stanford), FOM-института в Нидерландах (FELIX), Новосибирского ЛСЭ (NFEL), а также терагерцового источника Джефферсоновской лаборатории (JLab THz)

Ситуация в последние несколько лет существенно изменилась после предложения использовать для генерации излучения сверхкороткие электронные сгустки высокой плотности (рис. 2, справа). Если длина сгустка значительно короче длины волны излучения, то последнее является полностью когерентным. На этом принципе основан источник излучения, недавно запущенный в Джефферсоновской лаборатории (JLab THz), который генерирует излучение в широкополосное терагерцовое излучение (спектр см. на рис. 1) со средней мощностью около 100 Вт [2]. Имеются планы создания мощного источника такого типа в Брукхевенской национальной лаборатории (США) [3] и на источнике четвертого поколения в Дарсбери (Великобритания) [4].

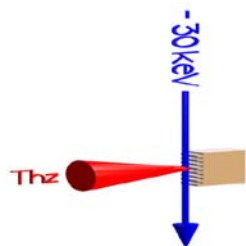


Fig. 1: Fundamental Smith Purcell structure. "It's simple. It's just a kind of whistle", I. I. Rabi describing the British magnetron to colleagues at the MIT Rad Lab [3].

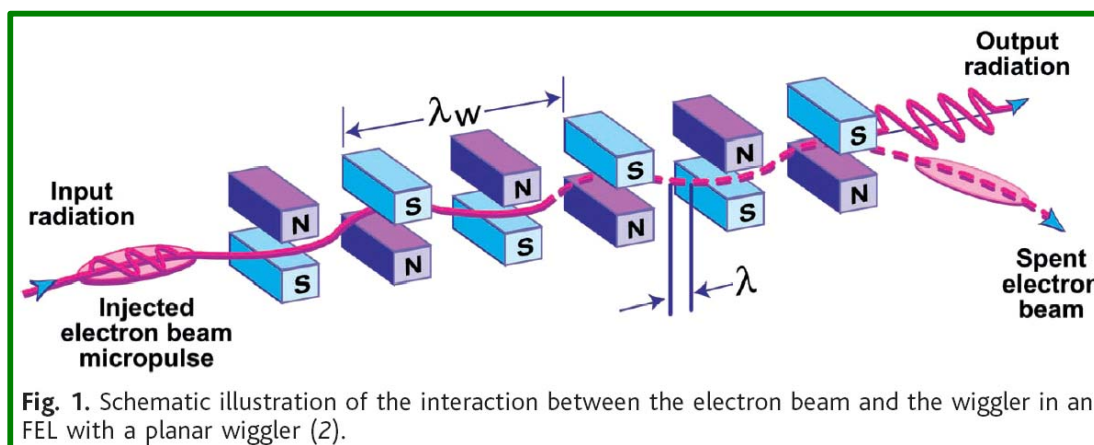
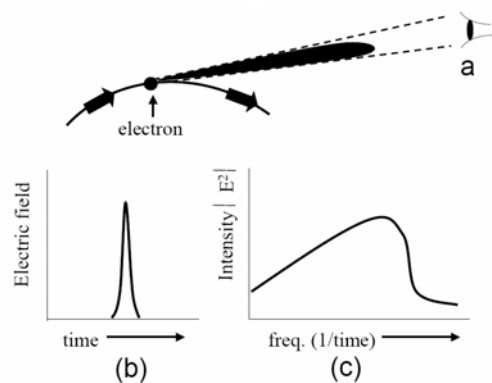


Fig. 1. Schematic illustration of the interaction between the electron beam and the wiggler in an FEL with a planar wiggler (2).

Рис. 2. Принципы генерации излучения в источниках на основе электронных пучков.

Еще одним источником длинноволнового излучения является источник Смита-Парселла (рис. 2, слева) [5], в котором электронный пучок генерирует излучение, пролетая вблизи поверхности металлической решетки. Самым кратким описанием принципа действия этого источника является выражение Раби: «Это просто свисток». В первых источниках этого типа использовался относительно низковольтный электронный пучок. В работе [6] описан более мощный источник с 15-МэВ электронным пучком. Схема установки и спектр генерируемого излучения как функция угла показаны на рис. 3. Источники такого типа маломощны и вряд ли могут серьезно конкурировать с синхротронами и лазерами на свободных электронах.

Наиболее мощными источниками, способными генерировать излучение терагерцового диапазона, являются лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), схема работы которых показана на рис. 2 внизу. Их излучение можно плавно перестраивать по частоте в достаточно широком спектральном диапазоне. Из терагерцовых лазеров, работающих в течение достаточно длительного времени, следует выделить лазеры в Стэнфордском университете, Калифорнийском университете в Санта Барбара, FELIX, и INEA (Фраскати). Параметры этих лазеров приведены в таблице 1. Эти устройства реально являются пользовательскими машинами, на которых специалисты из многих научных лабораторий выполнили множе-



ство работ в самых разных областях – от материаловедения до биологии и медицины. Последние работы, выполненные на этих ЛСЭ, будут описаны ниже.

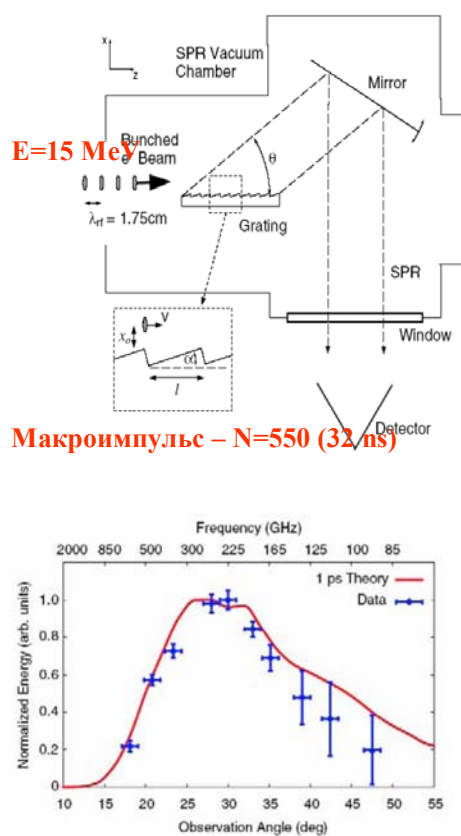


Рис. 3. Источник Смита–Парселла [7].

Эффективность генерации лазеров на свободных электронах не очень велика, поэтому следующее поколение ЛСЭ, рассчитанное на генерацию излучения с высокой средней мощностью, с необходимостью должно использовать электронные ускорители с рекуперацией энергии электронов. Самым мощным из существующих ЛСЭ сегодня является лазер Джефферсоновской лаборатории со средней мощностью генерации до 10 кВт. Его спектр, однако, лежит вне терагерцового диапазона, где самым мощным источником сейчас является Новосибирский ЛСЭ со средней мощностью излучения до 400 Вт [7]. Этот лазер детально описан в работе [8] настоящего сборника. Характеристики излучения лазера, представляющие интерес для пользователей, приведены в табл. 2. При достаточно высокой монохроматичности излучения оно является полностью пространственно когерентным по волновому фронту и имеет временную когерентность в диапазоне 40 – 100 пс, ограниченную, видимо, длительностью импульса электронов.

	Stanford	UCSB		FELIX	ENEA Compact FEL
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	15-80	63-340	340-2500	3-250	2000 - 3500
$\nu$ (THz)	3.75-20	0.88-4.8	0.12-0.88	1.2-100	0.09 – 0.15
Micropulse width	2-10 ps	-	-	6-100 cycles	50 ps
Micropulse Rep Rate	11.8 MHz	-	-	1000 MHz, 50 MHz, 25 MHz	3 GHz
Micropulse Energy	1 $\mu\text{J}$	-	-	1-50 $\mu\text{J}$	0.5 $\mu\text{J}$
Macropulse Width	0.5-5 ms	1-20 $\mu\text{s}$	1-6 $\mu\text{s}$	5 ms	4 $\mu\text{s}$
Macropulse Rep Rate	0-20 Hz	0-7.5 Hz	0-1.5 Hz	10 Hz	1 -10 Hz
Average Power	< 1 W	5-100 mW	5-100 mW	< 1 W	4 – 40 mW
Peak Power	< 500 kW	< 6 kW	< 15 kW	< 10 MW (@ 20 $\mu\text{m}$ ); <1 MW (@ 100 $\mu\text{m}$ )	10 kW (@ 2600 $\mu\text{m}$ )
Peak Field	< 250 kV/cm	< 70 kV/cm	<20 kV/cm	< 10 MV/cm (@ 20 $\mu\text{m}$ ); <2 MV/cm (@100 $\mu\text{m}$ )	3.5 kV/cm (@ 2600 $\mu\text{m}$ )

Таблица 1. Характеристики некоторых ЛСЭ терагерцового диапазона.

<b>Длина волны основной гармоники</b>	<b>(120 ... 235) мкм</b>
<b>Область спектра 2-й и 3-й гармоник</b>	<b>(40 ... 117) мкм</b>
<b>Относительная спектральная ширина</b>	<b>(0.3 ... 1) %</b>
<b>Диаметр гауссова пучка на выходе beamline</b>	<b>80 мм</b>
<b>Степень поляризации излучения</b>	<b>&gt;99.6 %</b>
<b>Поперечная когерентность</b>	<b>Полная</b>
<b>Временная когерентность</b>	<b>(40 ... 100) пс</b>
<b>Максимальная средняя мощность,</b>	<b>0.4 кВт (@11.2 МГц)</b>
<b>Длительность импульса</b>	<b>(40 ... 100) пс</b>
<b>Частота повторения</b>	<b>(2.8 ... 11.2) МГц</b>

**Таблица 2. Характеристики излучения Новосибирского ЛСЭ.**

Терагерцовое излучение является неионизирующим. Многие неорганические и органические молекулы имеют собственные частоты в терагерцовом диапазоне. В этом же диапазоне лежат энергии водородных связей. Многие вещества частично прозрачны для терагерцового излучения и имеют выраженные спектры поглощения, что открывает возможности для их диагностики и селективного воздействия излучения. Длина волны излучения достаточно велика, что позволяет использовать для управления излучением на два порядка большие по линейным размерам дифракционные элементы. Сечение релеевского рассеяния в газах для терагерцового излучения на восемь – девять порядков величины меньше, чем для излучения видимого диапазона, а порошкообразные среды с размерами частиц в десятки микрон являются для терагерцового излучения практически однородными. В этом спектральном диапазоне большая длина пробега поверхностных электромагнитных волн, что позволяет исследовать свойства и состав поверхностей. Особую привлекательность представляют использование терагерцового излучения для диагностики и терапии в биологии и медицине. Поэтому на терагерцовых ЛСЭ проводились исследования, в основном, в следующих областях:

- Физика твердого тела
- Спектроскопия
- Химия
- Биология и медицина
- Визуализация
- Системы безопасности
- Микроэлектроника
- Оптика атмосферы
- Связь
- Индустриальные применения

На конференции был представлен целый ряд докладов, из которых можно отметить следующие результаты. Исследование абляции графита на JFEL показало, что в собранном материале в большом количестве содержатся углеродные нанотрубки, получение которых представляет интерес для микроэлектронике [9]. Напыление NiFe пленок путем абляции материала пикосекундными импульсами ИК-диапазона, следующими с частотой 37,4 МГц, позволяют получить пленки крайне высокого качества по сравнению с абляцией обычными лазерами [10]. Нитрид-борное покрытие, нанесенное путем абляции материала фемтосекундными импульсами ЛС, позволяет достичь твердости покрытия в 2 раза больше, чем при обычной абляции и в 4 раза выше, чем для непокрытого титана. Эти ре-

зультаты получены с использованием излучения ближнего и среднего ИК-диапазона и было бы крайне интересно провести подобные исследования в мощном пучке терагерцового лазера.

Результаты исследований кластеров металлов и оксидов металлов, представляющих интерес для катализа, были представлены в докладе [11]. Многофотонную диссоциацию или ионизацию кластеров невозможно осуществить в ТГц-диапазоне с маломощными источниками, поэтому измерения велись в спектральном интервале  $150 - 2000 \text{ см}^{-1}$  на ЛСЭ FELIX. Кластеры, как объекты исследования, представляют особый интерес, поскольку их свойства отличаются и от свойств изолированных атомов и молекул, и от свойств массивных материалов, состоящих из тех же элементов. Спектры многофотонной диссоциации комплексов катионов кластеров ванадия с аргоном позволили определить геометрическую структуру кластеров с числом атомов ванадия от трех до пятнадцати. Измерения колебательных спектров показали, что кластеры оксидов ванадия имеют структуру полиэдра. Наконец, методом многофотонной диссоциации были обнаружены несколько вариантов связи молекулы СО с комплексами родия. Сумма результатов ясно показывает, что метод многофотонной диссоциации с использованием ЛСЭ весьма перспективен для исследования химии малых металлических комплексов.

Возможности инфракрасной спектроскопии биомолекул в газовой фазе, которая исключает маскирующее влияние внешней среды и получить фундаментальные знания об их структуре и функционировании, также продемонстрированы на ЛСЭ FELIX [12]. В докладе приведены ИК-спектр молекулы  $\text{CH}_5^+$ , колебательные спектры поглощения пептидов, спектры фотодиссоциации различных зарядовых состояний протеина.

Экспериментам по построению изображений на ЛСЭ INEA с помощью металлических конусов и волноводов при прохождении излучения с частотой  $0,13 \text{ ТГц}$  через объекты или при отражении от них посвящен доклад [13]. Визуализация изображений на Новосибирском ЛСЭ, а также целый ряд других экспериментов, были представлены на IRMMW-2005 в серии докладов, содержание которых изложено в соответствующих статьях данного сборника.

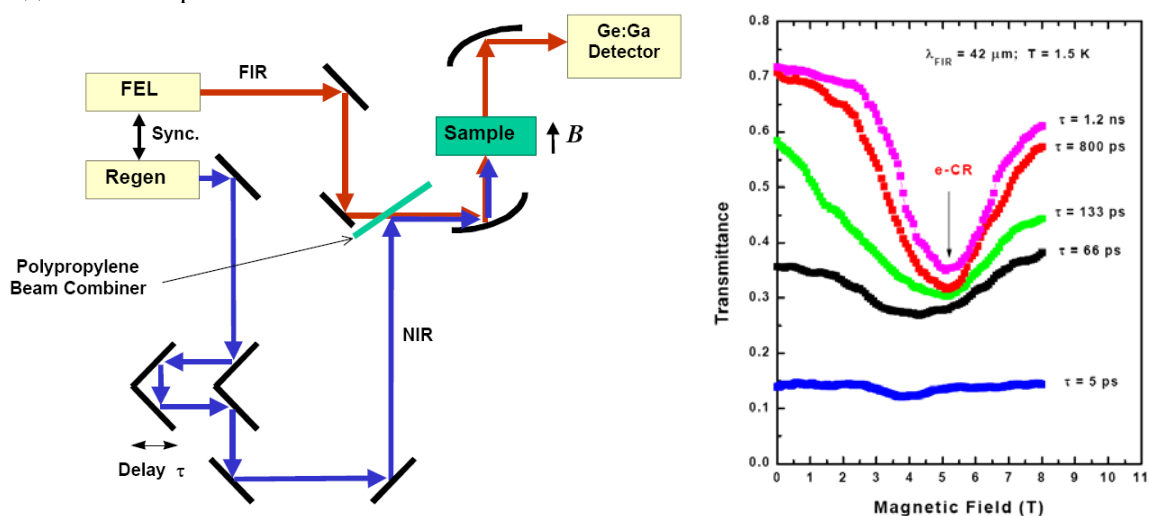


Рис. 4. Установка для измерения ядерного магнитного резонанса в режиме «накачка (ближнее ИК-излучение фемтосекундного лазера) – зондирование (пикосекундный терагерцовый ЛСЭ)».

В данном обзоре следует также упомянуть несколько работ, выполненных в последние годы на Стэнфордском ЛСЭ, которые не были представлены на конференции, но заведомо представляют значительный интерес для возможных пользователей Новосибирского ЛСЭ. Эти работы представлены в обзоре [14], предназначенном, по-видимому, для публикации в трудах SPIE. Схема установки, на которой с помощью интенсивного, перестраиваемого когерентного излучения ЛСЭ впервые были получены спектры ЯМР в терагерцовом диапазоне с пикосекундным временным разрешением, показана на рис. 4. Лазер

накачки создавал неравновесные носители в полупроводнике InSb, а дальнейшее ИК-излучение использовалось либо как зондирующее (для изучения релаксации носителей), либо как накачивающее (для сдвига уровней энергии внутри зоны проводимости и валентной зоны).

Для слабо поглощающих газов весьма полезной может быть реализованная на ЛСЭ в Стэнфорде система с многократным прохождением излучения в оптическом резонаторе (ring-down spectroscopy). Оригинальный метод ближнепольной микроскопии, в котором субволновое (для терагерцового излучения) отверстие образуется путем импульсного возбуждения носителей в полупроводнике излучением лазера видимого диапазона, что создает короткоживущее кольцевое «зеркало», позволяет обойтись без обычной в таких случаях материальной апертуры. Надо отметить, что этот способ, видимо, может быть использован для создания быстрого затвора для терагерцового излучения.

Особо отметим эксперимент по исследованию полосы поглощения амида I в миоглобине уже упомянутым методом «накачка – зондирование». Схема измерений «накачка – зондирование», очевидно, вообще представляет большой интерес для самых разных исследований на терагерцовых ЛСЭ. Особенно полезным он может быть для исследования биологических объектов.

Даже краткое перечисление исследований, выполненных на терагерцовых ЛСЭ одной стороны, СЭ, показывает достаточно большой спектр возможностей ЛСЭ, с другой, свидетельствует о том, что многие из этих возможностей все еще не реализованы. Во многом это связано с тем, что многие потенциальные пользователи либо не знают обо всех особенностях и свойствах ЛСЭ, либо просто требуется время для привлечения пользователей к работе на Новосибирском ЛСЭ. Настоящее совещание должно послужить стимулом к этому.

### Литература

1. Г. Н. Кулипанов, А. Н. Скринский. УФН, 1977, т. 122, с. 369.
2. A. M. M. Todd, H. P. Bluem, V. Christina et al. Proc. Joint 30<sup>th</sup> Intl. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13<sup>th</sup> Intl. Conf. on Terahertz Electronics, Williamsburg, USA, September 19 – September 23, 2005 (далее обозначается сокращенно «Proc. IRMMW-2005»), p. 497.
3. Michael C. Martin, John Byrd, Zhao Hao et al. Proc. IRMMW-2005, p. 489.
4. D. T. Clarke, E. A. Seddon<sup>†</sup>, F. M. Quinn et al. *4GLS – A Fourth Generation Light Source that for the biomedical scientist is more than a laser and more than a storage ring.*  
<http://www.4gls.ac.uk/documents.htm>.
5. M. Mross, T. H. Lowell, R. Durant and M. F. Kimmitt. Proc. IRMMW-2005, p. 491.
6. J. R. Sirigiri, A. S. Kesar, S. E. Korbly and R. J. Temkin. Proc. IRMMW-2005, p. 247.
7. V. P. Bolotin, V. S. Cherkassky, E. N. Chesnokov et al. Proc. IRMMW-2005, p. 495.
8. Н. А. Винокурову Статья в настоящем сборнике.
9. G. R. Neil. Proc. IRMMW-2005, p. 573.
10. A. C. Reilly. Proc. IRMMW-2005, p. 287.
11. B. Redlich. Proc. IRMMW-2005, p. 164.
12. B. Redlich. Proc. IRMMW-2005, p. 307.
13. A. Doria, G.P. Gallerano, M. Germini et al. IRMMW-2005, p. 255.
14. T. I. Smith. Research on Picosecond Processes in Biological, Chemical, and Materials Science Systems using the Infrared Beam at the Stanford Free Electron Laser Center, web-server Stanford FEL.