

УДК 621.373.826; 621.384.64

С. В. Мигинский

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: S.V.Miginsky@inp.nsk.su

ПРОЕКТ КОМПАКТНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

В последнее время резко возрос интерес к исследованиям с использованием электромагнитных волн терагерцового диапазона. В то же время источники излучения этого диапазона либо маломощны, либо слишком громоздки и дороги. Компактный ЛСЭ, разрабатываемый в настоящее время в Институте ядерной физики СО РАН, как раз является относительно недорогой и мощной машиной. ЛСЭ строится на базе специализированного линака 20 см диапазона. В работе рассмотрены все вопросы начальной стадии проекта, а также приведены ожидаемые параметры машины.

Ключевые слова: лазер на свободных электронах, терагерцовый диапазон, линейный ускоритель.

Введение

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) известны уже несколько десятков лет. Прогресс в этой области значителен – можно создать ЛСЭ в любом наперед заданном диапазоне длин волн – от миллиметров до ангстрем, а средняя мощность излучения в некоторых проектах превосходит 1 МВт [1.–3]. Однако любой ЛСЭ – это большая и дорогая машина. В Институте ядерной физики СО РАН разрабатывается относительно компактная, недорогая, но мощная и эффективная машина.

В настоящее время наблюдается взрывной рост интереса к исследованиям в терагерцовом диапазоне электромагнитных волн (примерно от 30 до 300 мкм) [4]. Но источники излучения этого диапазона либо маломощны, либо слишком громоздки и дороги, так что представляется разумным выбрать диапазон длин волн новой машины в этой области.

Основная схема ЛСЭ

Основная идея проекта – сделать машину максимально простой и эффективной одновременно. Для достижения этой цели мы используем наиболее простую традиционную схему ЛСЭ и ряд технических приемов.

Электронный пучок производится несверхпроводящим (медным) импульсным линаком 20 см диапазона. Эффективность такого линака может быть вполне удовлетворительной, а пиковый ток сгустка весьма высоким. Последний параметр критичен для эффективности собственно ЛСЭ. Мы не используем рекуперацию энергии отработанного пучка, так как этот процесс для импульсной машины чрезвычайно сложен. При этом выигрыш в общей эффективности невелик – рекуперация значительно снижает лишь радиационный фон от машины.

Нам понадобится отдельный инжектор с группирователем, чтобы получить качественный пучок на выходе линака, так как энергетический разброс пучка уширяет линию излучения ЛСЭ. Мы выбрали электронную пушку диодного типа с импульсным питанием от того же модулятора, что и клистрон. Ток в пределах макроимпульса модулирован ВЧ сигналом, поданным в зазор катод-сетка. Группирователь состоит из группировочного резонатора на основной частоте и пролетного промежутка. Далее сгруппированные сгустки ускоряются до энергии 10 МэВ в медной ВЧ структуре с параллельным питанием ячеек.

Собственно ЛСЭ состоит из импульсного спирального ондулятора и двухзеркального открытого оптического резонатора. Вывод

излучения осуществляется через круглое отверстие на оси одного из зеркал. Разумеется, эта простейшая схема вывода обладает эффективностью лишь около 50 %, так что в дальнейшем имеет смысл рассмотреть более эффективные схемы. Компонка и общий вид машины приведены на рис. 1 и 2.

Электронная пушка

Электронная пушка генерирует электронный пучок для дальнейшей группировки и ускорения. Качество пучка должно быть достаточно высоким, равно как и его пиковый ток. Мы выбрали обычную диодную схему с импульсным питанием от модулятора клистрона и модуляцией тока сеткой на основной частоте. Такая конструкция обеспечивает все необходимые параметры пучка, достаточно проста и недорога.

Основные параметры пушки следующие: максимальное напряжение 250 кВ; максимальный пиковый ток 4,4 А; максимальный средний ток в макроимпульсе 1,1 А. В качестве эмиттера применяется катодно-сеточный узел СР1/Е1МАС У-824. Небольшая

часть ВЧ мощности отводится от клистрона и подается на зазор катод-сетка, так что длительность сгустка составляет несколько менее полупериода ВЧ. Геометрия пушки приведена на рис. 3. Критические проблемы на данном этапе: сеточный эмиттанс, эмиттанс из-за собственного заряда и форма импульса. Результаты численного моделирования представлены на рис. 4–7.

Из-за продольного эффекта собственного заряда электрическое поле на сетке зависит от мгновенного тока пучка. Поля по обе стороны сетки приведены на рис. 4. Поле в зазоре катод-сетка (пунктир) растет с током, а поле снаружи (сплошная) убывает. Минимум сеточного эмиттанса достигается при равенстве этих полей, что соответствует току 3,1 А в данной геометрии. Если эти поля отличаются, каждая ячейка сетки действует как электростатическая линза и эмиттанс растет (см. рис. 5, а). Пунктирные линии на этом рисунке – оценки эффекта собственного заряда из 5.]. Очевидно, что сеточный эмиттанс значителен лишь для сравнительно малых мгновенных токов, не более 0,7 А. Усредненный по сгустку нормализованный

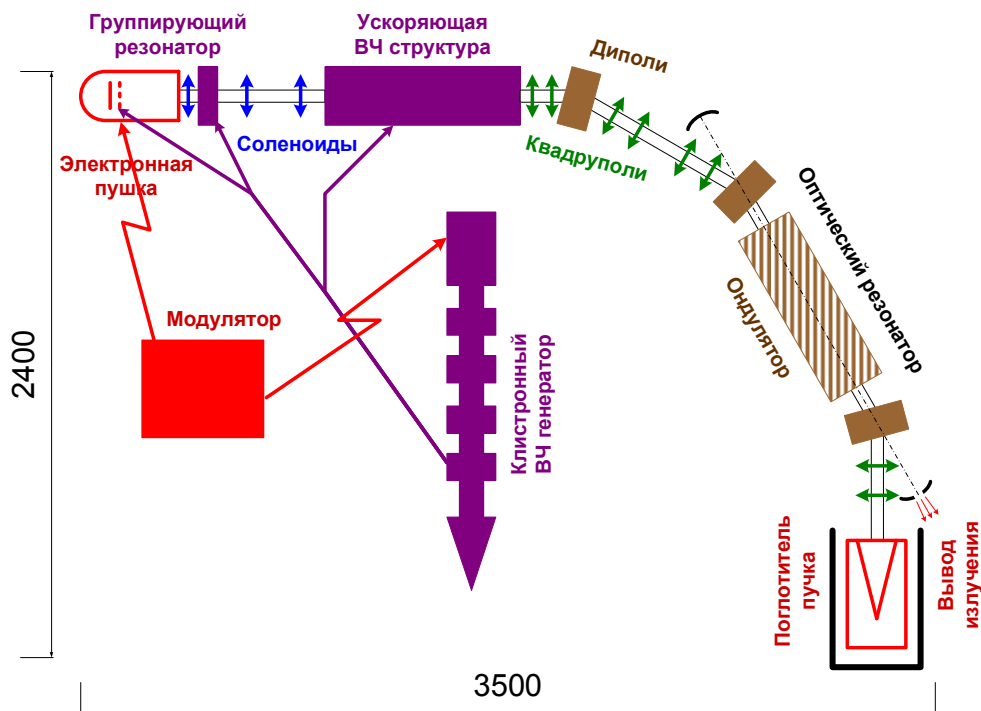


Рис. 1. Компонка ЛСЭ

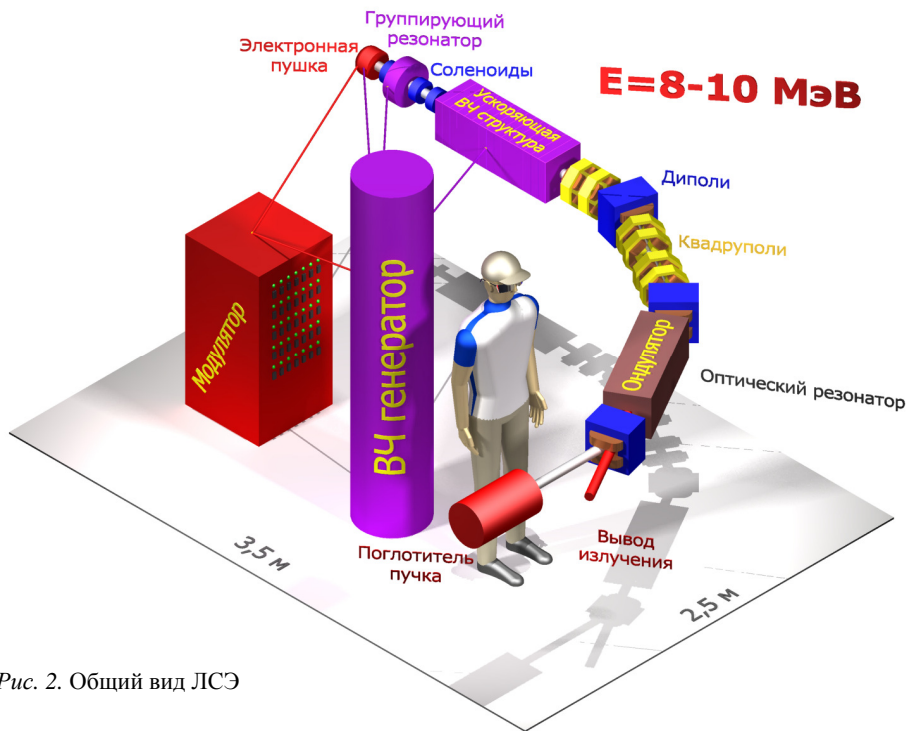


Рис. 2. Общий вид ЛСЭ

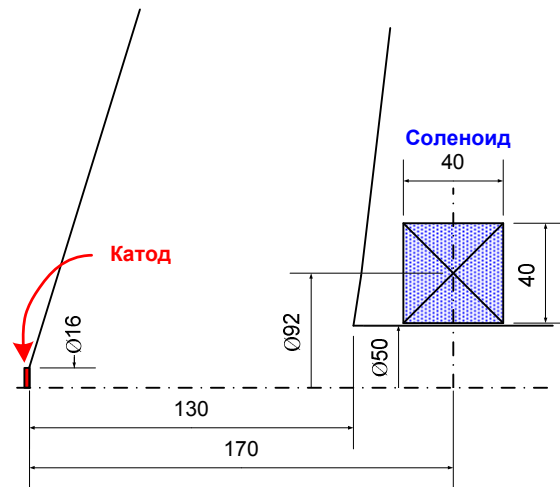


Рис. 3. Геометрия электронной пушки

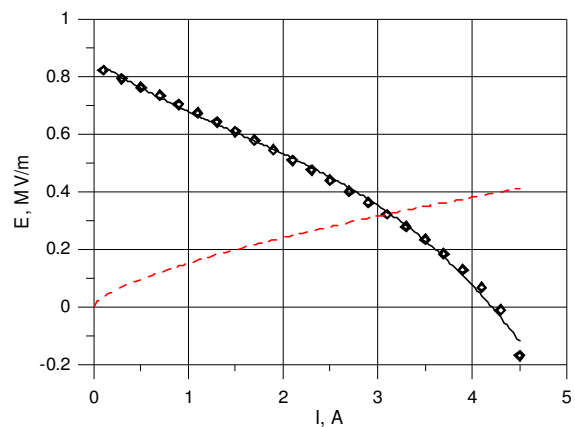


Рис. 4. Электрические поля по обе стороны сетки в зависимости от тока

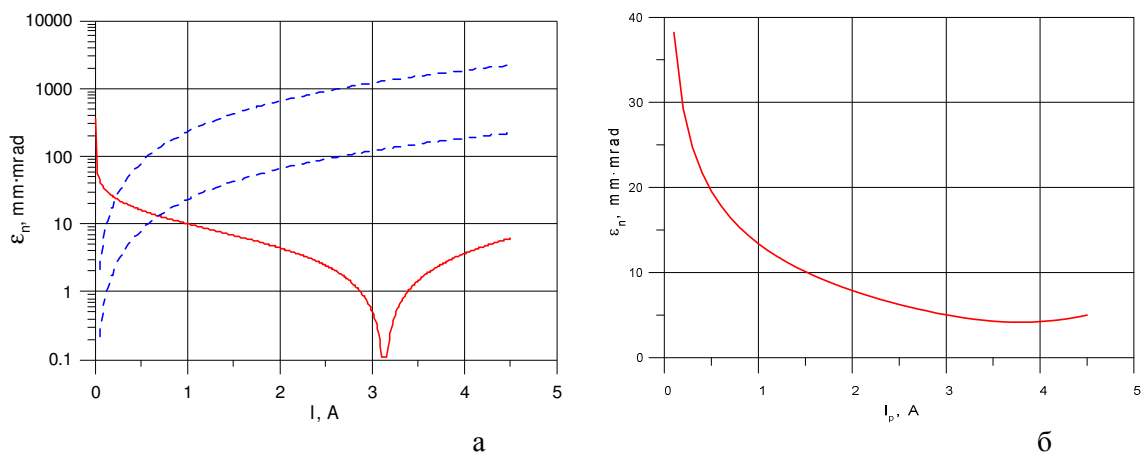


Рис. 5. Нормализованный сеточный эмиттанс: *a* – в зависимости от тока (пунктирными линиями обозначены оценки эффекта собственного заряда); *б* – усредненный по сгустку в зависимости от пикового тока

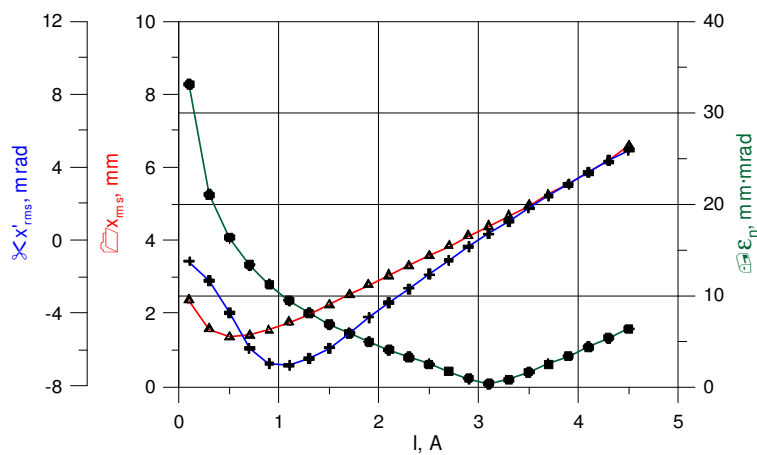


Рис. 6. Среднеквадратичный размер (Δ), его производная (+) и нормализованный эмиттанс (\bullet) в зависимости от тока

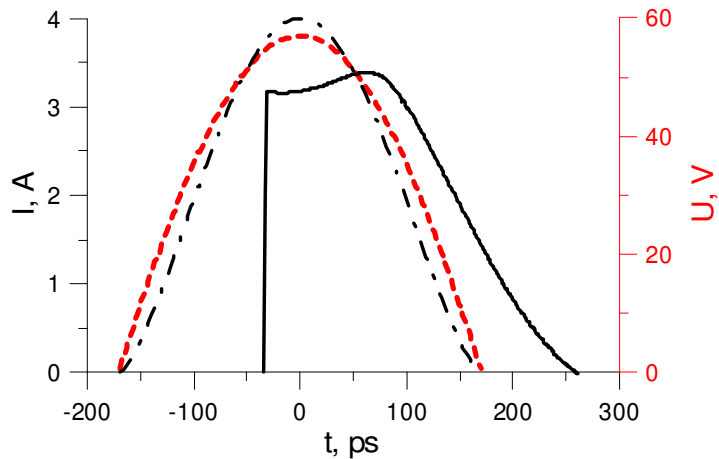


Рис. 7. Влияние промежутка катод-сетки на форму импульса. Напряжение на сетке (пунктир), ток катода (штрихпунктир) и ток за сеткой (сплошная)

сеточный эмиттанс показан на рис 5, б. Как можно заметить, он весьма мал, если пиковый ток близок к максимуму в данной геометрии.

Другая известная проблема – нелинейность оптики пушки с учетом собственного заряда. Нелинейность может быть устранена только для какого-то определенного тока. Этот эффект также увеличивает эмиттанс. Результат нелинейности можно увидеть на рис. 6. Все явления, рассмотренные выше, дают эмиттанс в сумме не более 10 мм·мрад, что значительно лучше технических требований в нашем случае.

Еще одна проблема возникает из-за конечного времени пролета электронами промежутка катод-сетка. Это время зависит от напряжения на зазоре и распределения плотности тока внутри него, так что форма импульса искажается. В нашем случае (1,3 ГГц, узел СР/ЕИМАС Y-824 и пиковый ток около 4 А) эти искажения не слишком велики (рис. 7).

Группирователь и линак

Для эффективной работы ЛСЭ необходим высокий пиковый ток сгустка, его значительный заряд и длительный макроимпульс. Выбор импульсного медного линака 20-сантиметрового диапазона с параллельным питанием секций – компромисс между требованиями простоты и дешевизны. Вре-

мяпролетный группирователь на основной частоте расположен между пушкой и линаком (рис. 8). Он предназначен для уменьшения длительности ускоряемых в линаке сгустков. При этом достигаются две цели: (1) уменьшается коррелированный энергетический разброс сгустка, набираемый в линаке, и (2) увеличивается пиковый ток. Так как собственный заряд пучка оказывает сильное влияние на движение электронов вплоть до некоторой энергии, сопоставимой с максимальной, имеет смысл применить технологию «компенсации эмиттанса» [6.], чтобы уменьшить эмиттанс на выходе машины. Параллельное питание секций ускоряющей структуры необходимо для увеличения максимального тока, пропускаемого структурой. Ток ограничен поперечной неустойчивостью движения [7.]. Клистрон Thales TV2022В представляется наилучшим выбором ВЧ генератора в нашем случае – он обеспечивает достаточную импульсную мощность и сравнительно длинный импульс.

При оптимальной геометрии и соответствующей настройке машины пиковый ток сгустков на выходе весьма велик (рис. 9, а), а их энергетический разброс мал (рис. 9, б). Изменение параметров сгустка в процессе группировки и ускорения можно видеть на рис. 10. Нужно отметить, что колебания эмиттанса на рис. 10, б типичны для технологии компенсации эмиттанса. Основные параметры линака сведены в табл. 1.

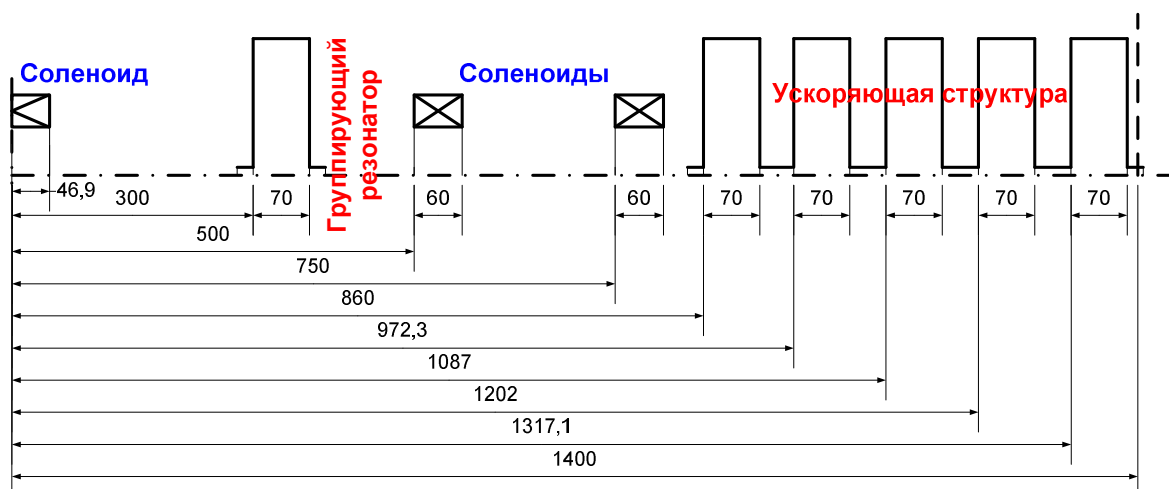


Рис. 8. Геометрия группирователя и линака

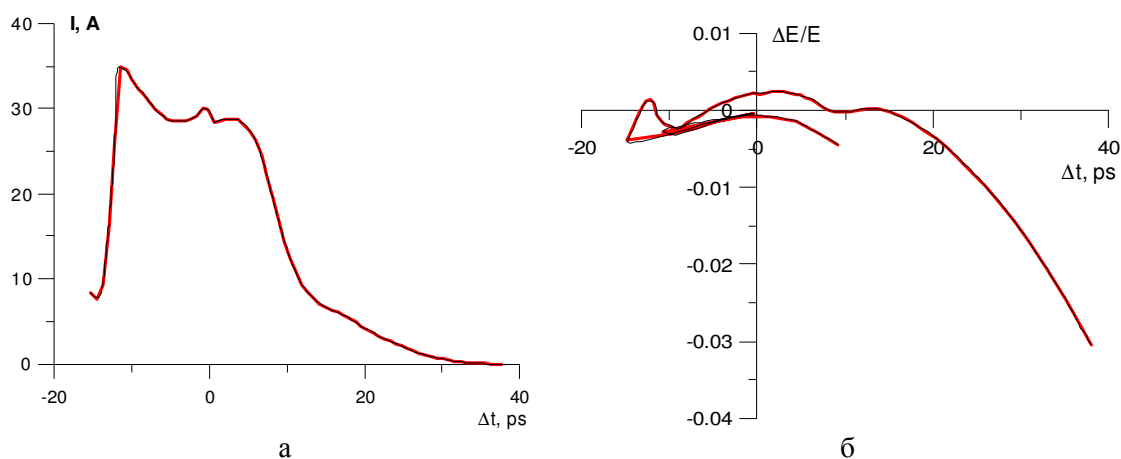


Рис. 9. Ток сгустка (а) и продольный фазовый портрет сгустка (б) на выходе линака

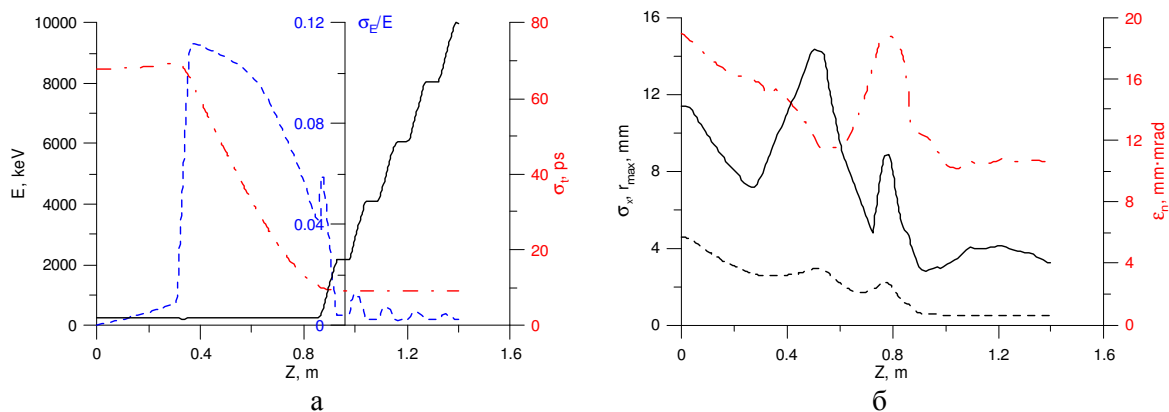


Рис. 10. Изменение параметров сгустков вдоль машины: а – энергия (сплошная), среднеквадратичный энергетический разброс (пунктир) и среднеквадратичная длительность (штрихпунктир); б – максимальный поперечный размер (сплошная), среднеквадратичный поперечный размер (пунктир) и нормализованный эмиттанс (штрихпунктир)

Таблица 1

Основные параметры линака

Параметр	Единицы измерения	Величина
Средний ток в макроимпульсе	А	1
Пиковый ток катода	А	4
Кинетическая энергия электронов	МэВ	10
Среднеквадратичный энергетический разброс	%	0.24
Среднеквадратичная длительность сгустка	пс	9.2
Длительность сгустка на полувысоте	пс	22
Пиковый ток сгустка	А	30
Нормализованный эмиттанс	мм·мрад	10.5
Частота ВЧ питания	ГГц	1.3
Длительность макроимпульса	мкс	10
Частота повторения	Гц	300
Средняя мощность пучка	кВт	30

ЛСЭ

Собственно ЛСЭ построен по классической схеме с открытым оптическим резонатором и импульсным спиральным ондулятором. Его схема представлена на рис. 11. Отверстие на оси одного из зеркал резонатора используется для вывода излучения.

При этом около 50 % выводимого излучения теряется, так что в будущем имеет смысл рассмотреть другие схемы. Все параметры ЛСЭ оптимизированы численно, результаты можно видеть на рис. 12–14. Отметим, что ширина полосы излучения ЛСЭ (см. рис. 12, б) близка к дифракционному пределу. Основные параметры ЛСЭ сведены в табл. 2.

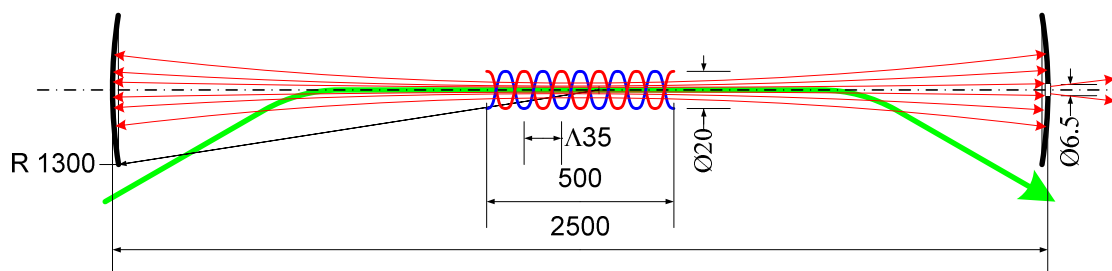


Рис. 11. Геометрия ЛСЭ

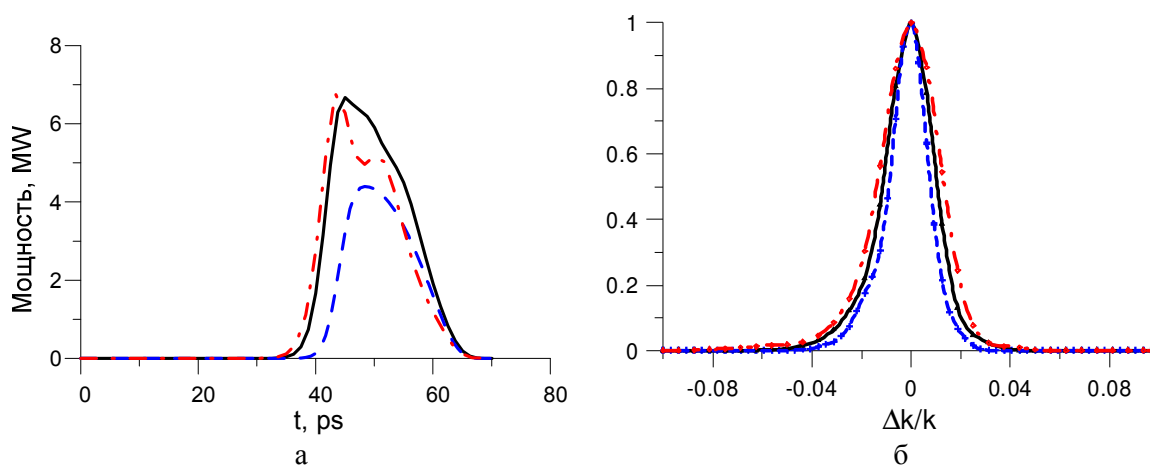


Рис. 12. Импульсы (а) и спектры (б) излучения ЛСЭ в насыщении.

Здесь и далее: длина волны 100 мкм (пунктир), 150 мкм (сплошная) и 200 мкм (штрихпунктир); расстройка 32 мкм

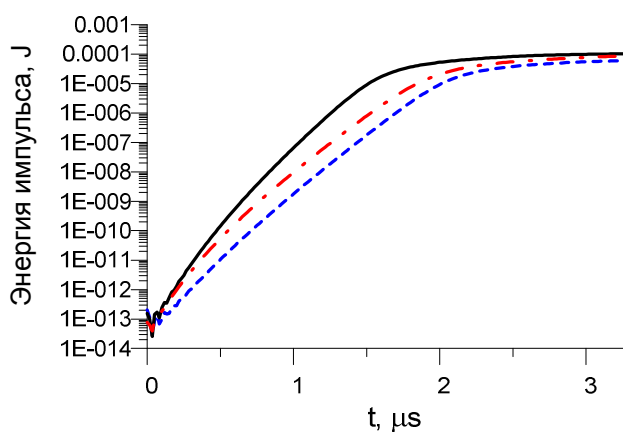


Рис. 13. Процесс насыщения ЛСЭ

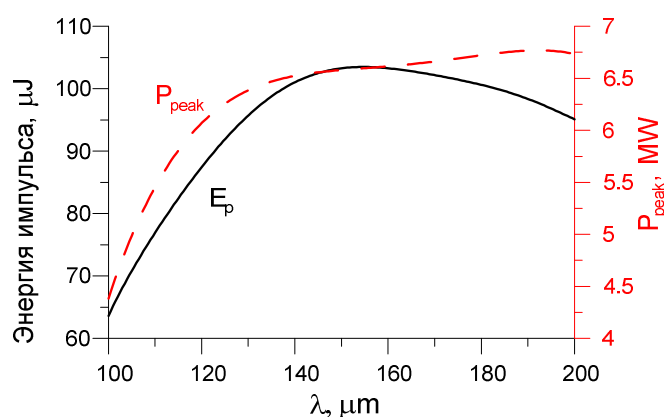


Рис. 14. Энергия в импульсе (сплошная) и пиковая мощность (пунктир) импульса ЛСЭ в насыщении в зависимости от длины волны

Таблица 2

Основные параметры ЛСЭ

Параметр	Единицы измерения	Величина
Ондулятор		
Тип – спиральный		
Период	мм	35
Длина	м	0,5
Максимальное К		2
Диаметр апертуры	мм	20
Оптический резонатор		
Длина	м	2,5
Тип зеркал – полностью отражающие		
Коэффициент отражения зеркал	%	≥ 99
Радиус кривизны зеркал	м	1,3
Диаметр выходного отверстия	мм	6,5
Излучение		
Диапазон перестройки длин волн	мкм	100...200
Относительная ширина полосы на полувысоте	%	1,7...2,7
Длительность микроимпульса на полувысоте	пс	14...17
Пиковая мощность	МВт	4,3...6,6
Максимальная средняя мощность	Вт	190...330
Технический электронный к.п.д.	%	0,63...1,1

Выводы

Первый этап проекта компактного ЛСЭ успешно завершен. Показано, что на современном уровне техники возможна разработка компактной и недорогой машины, излучающей сотни ватт в терагерцовом диапазоне. Разработка может быть завершена в разумные сроки. Сформирован список вопросов и проблем для следующего этапа проекта. Дальнейшие работы могут быть начаты в любое время. После изготовления,

пуска и наладки прототипа машина может производиться мелкими сериями.

Список литературы

1. Abramovich A., Pinhasi Y., Yahalom A. et al. Optimization of Power Output and Study of Electron Beam Energy Spread in a Free Electron Laser Oscillator // Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A. 2001. Vol. 475. P. 579.
2. Emma P., Akre R., Arthur J. et al. First Lasing and Operation of an Ångström-Wave-

length Free-Electron Laser // *Nature Photonics*. 2010. Vol. 4. P. 641.

3. *Boyce J. R.* The Jefferson Lab High Power Light Source // *AIP Conf. Proc.* 2006. Vol. 807. P. 348.

4. *Martinez E. J.* Next Generation of Terahertz Sources and Detectors // *Proc. 11th International Symposium on Space Terahertz Technology*, May 1–3, 2000. Ann Arbor, Michigan, 2000.

5. *Miginsky S. V.* Minimization of Space Charge Effect // *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A*. 2007. Vol. 575. P. 234.

6. *Carlsten B. E.* New Photoelectric Injector Design for the Los Alamos National Laboratory XUV FEL Accelerator // *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A*. 1989. Vol. 285. P. 313.

7. *Wu Chao A.* *Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators*. Wiley-Interscience Publication, 1993.

Материал поступил в редколлегию 23.11.2010

S. V. Miginsky

COMPACT THZ FEL PROJECT

Interest in scientific research using terahertz electromagnetic waves is rapidly increasing recently. At the same time sources of radiation of this range either are very low-power, or too bulky and expensive. A compact FEL being developed recently at the Budker Institute of Nuclear Physics is exactly a relatively inexpensive and powerful machine. The FEL is based on a dedicated L-band linac. All the aspects of the feasibility study of the project are discussed. The expected parameters of the machine are listed.

Keywords: free electron laser, terahertz band, linac.