

УДК 621.384.6+621.373

НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*О. А. Шевченко**, В. С. Арбузов, Н. А. Винокуров, П. Д. Воблый, В. Н. Волков,
Я. В. Гетманов, И. В. Давидюк, О. И. Дейчули, Е. Н. Дементьев, Б. А. Довженко,
Б. А. Князев, Е. И. Колобанов, А. А. Кондаков, В. Р. Козак, Е. В. Козырев, В. В. Кубарев,
Г. Н. Кулипанов, Э. А. Купер, И. В. Купцов, Г. Я. Куржин, С. А. Крутихин,
Л. Э. Медведев, С. В. Мотыгин, В. К. Овчар, В. Н. Осипов, В. М. Петров, А. М. Пилан,
В. М. Попик, В. В. Репков, Т. В. Саликова, И. К. Седляров, С. С. Середняков,
А. Н. Скрябинский, С. В. Тарарышкин, А. Г. Трибендис, В. Г. Ческидов, К. Н. Чернов,
М. А. Щеглов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Россия

Лазеры на свободных электронах являются уникальными источниками электромагнитного излучения с перестраиваемой длиной волны. В ИЯФ СО РАН создан мощный лазер на свободных электронах, частота излучения которого может изменяться в широких пределах в терагерцовой и инфракрасной областях спектра. В качестве источника электронов в нём используется многооборотный ускоритель с рекуперацией энергии, который имеет пять прямолинейных промежутков. В трёх из них установлены лазеры на свободных электронах, работающие в разных диапазонах длин волн ($90 \div 240$ мкм для первого, $37 \div 80$ мкм для второго и $5 \div 20$ мкм для третьего). Первый и второй лазеры были запущены в 2003 и 2009 году соответственно, и в настоящее время на них выполняются различные прикладные и исследовательские работы. Третий лазер установлен на последней, четвёртой, дорожке ускорителя, где энергия электронов максимальна. Он состоит из трёх секций ондулятора и оптического резонатора с длиной 40 м. Летом 2015 года на этом лазере впервые было получено излучение на длине волны 9 мкм со средней мощностью около 100 Вт. Проектная мощность излучения составляет 1 кВт при частоте повторения импульсов 3,75 МГц. В ближайшее время планируется вывести излучение третьего лазера из защищённого зала на пользовательские станции. В данной работе представлены результаты запуска третьего лазера, а также описаны текущие работы на первом и втором лазерах и ближайшие перспективы их развития.

ВВЕДЕНИЕ

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) являются уникальными источниками монохроматического электромагнитного излучения (см., например, [1–3]). Принцип работы ЛСЭ основан на эффекте усиления электромагнитной волны при её взаимодействии с электронным пучком в ондуляторе. Условие синхронизма, при выполнении которого возможно осуществить передачу энергии от электронов излучению, связывает длину волны излучения с энергией электронов, а также с амплитудой и периодом магнитного поля в ондуляторе. Меняя эти параметры, можно плавно перестраивать длину волны в достаточно широких пределах. В этом заключается основное преимущество ЛСЭ перед обычными лазерами. Существует два основных типа ЛСЭ: однопроходные ЛСЭ-усилители с большим коэффициентом усиления, на вход которых подаётся внешний сигнал или спонтанное излучение электронного пучка, и ЛСЭ с обратной связью, называемые также ЛСЭ-генераторами. Обратная связь, как правило, осуществляется при помощи оптического резонатора.

* O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

В ИЯФ СО РАН создан уникальный лазер на свободных электронах (Новосибирский ЛСЭ), со средней мощностью излучения около 0,5 кВт, пиковой мощностью порядка 1 МВт и диапазоном перестройки длин волн от 5 до 240 мкм. Данный лазер относится к классу ЛСЭ-генераторов. В настоящее время по своим параметрам он значительно превосходит аналогичные зарубежные установки (см. [4]). В терагерцовом диапазоне частот работают и другие типы источников узкополосного излучения: гиротроны с импульсной мощностью киловаттного уровня на частотах до 1,3 ТГц [5], перестраиваемые по частоте лампы обратной волны с мощностью порядка 1 мВт и с частотой до 1,4 ТГц [6], полупроводниковые лазеры с частотами порядка 10 ТГц и с мощностью до 1 Вт, лазеры на парах воды с мощностью порядка 1 мВт на некоторых частотах порядка нескольких терагерц и некоторые другие лазеры. Высокая пиковая и средняя мощность излучения ЛСЭ в сочетании с возможностью перестройки длины волны делают их привлекательными для научных и технологических применений.

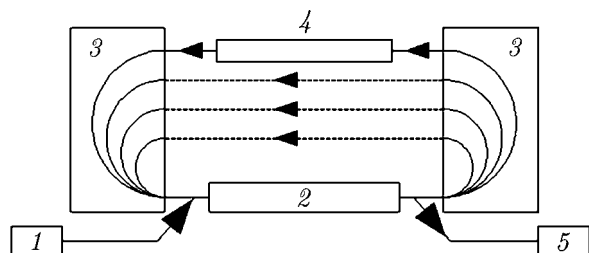


Рис. 1. Простейшая схема многооборотного ускорителя-рекуператора: 1 — инжектор, 2 — ускоряющая структура, 3 — поворотные магниты, 4 — ондулятор, 5 — поглотитель

Основной частью любого ЛСЭ является ускоритель электронов. В ЛСЭ используются ускорители разных типов, однако для создания мощных лазеров наиболее удачным решением является применение особого класса электронных ускорителей — высокочастотных ускорителей-рекуператоров (УР), изобретённых А. Н. Скринским и Н. А. Винокуровым в 1978 году. В ЛСЭ излучению от электронного пучка передаётся лишь незначительная часть энергии, поэтому, чтобы получить высокую среднюю мощность излучения, необходимо использовать пучки с большим средним током. При этом возникает проблема утилизации отработанного пучка. Она может быть частично решена за счёт рекуперации энергии пучка в ускоряющей структуре, которая обеспечивается в схеме УР (рис. 1). В этой схеме пучок вначале ускоряется, потом используется в ЛСЭ, а затем замедляется и сбрасывается в поглотитель. Также в этой схеме за счёт небольшого усложнения структуры можно увеличить энергию пучка на последней дорожке с помощью его многократного прохождения через ускоряющую структуру в ускоряющей фазе.

В Новосибирском ЛСЭ используется схема многооборотного ускорителя-рекуператора, преимущество которой заключается в возможности получить более высокую энергию пучка при более короткой ускоряющей структуре. В то же время она имеет один существенный недостаток. Для пучка на стадиях ускорения и замедления в этой схеме необходимо использовать одни и те же дорожки, что существенно усложняет настройку ускорителя. Данную проблему, в принципе, можно решить, используя несколько более сложную схему с двумя ускоряющими структурами [7].

1. ОБЩАЯ СХЕМА И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ

В настоящее время Новосибирский ЛСЭ является единственным в мире многооборотным УР. Он имеет довольно сложную структуру, схема которой представлена на рис. 2. Всю установку можно условно разделить на три ускорителя-рекуператора (однооборотный, двухоборотный и четырёхоборотный), которые имеют общий инжектор и общую ускоряющую структуру. Выбор режима работы ускорителя осуществляется переключением поворотных магнитов. На прямолинейных участках УР установлены ондуляторы трёх лазеров на свободных электронах с разными диапазонами перестройки длин волн.

Однопроходный ускоритель-редуктор включает в себя общий инжектор и инжекционный канал, а также ускоряющую структуру и одну дорожку, расположенную в вертикальной плоскости. Формируемый в электронной пушке пучок имеет заряд около 1 нКл и длительность около 1,5 нс. Кинетическая энергия электронов составляет 300 кэВ. Затем он группируется, ускоряется до энергии электронов 2 МэВ и инжектируется в основную ускоряющую структуру. В инжекторе используется электростатическая пушка с термокатодом, которая подключена к высоковольтному источнику с напряжением 300 кВ и максимальным током 50 мА. В будущем мы планируем также использовать высокочастотную пушку, разработка которой ведётся в настоящее время в ИЯФ СО РАН. На нижней дорожке УР установлены ондуляторы первого лазера, работающего в терагерцовой области частотного спектра. Он был введён в эксплуатацию в 2003 году, и в настоящее время на нём ведутся прикладные и исследовательские работы [8].

Дорожки двух оставшихся ускорителей-редукторов расположены в горизонтальной плоскости. На общей дорожке, где находится основная ускоряющая структура, имеются два круглых поворотных магнита. При включении этих магнитов электронный пучок движется по горизонтальным дорожкам. Часть магнитной системы, осуществляющая поворот пучка на 180° , также включает в себя маленькие поворотные магниты с параллельными друг другу краями и квадрупольные линзы. С целью уменьшения чувствительности системы к пульсациям тока все магниты соединены последовательно. Градиенты магнитного поля в квадрупольных линзах выбираются из условия ахроматичности поворотов. Вакуумные камеры горизонтальных дорожек сделаны из алюминия и имеют внутри каналы для охлаждения.

На второй горизонтальной дорожке имеется байпас, на котором установлен ондулятор второго лазера. За счёт удлинения траектории на 0,7 м при прохождении электронного пучка через байпас возникает временная задержка, в результате которой пучок возвращается в ускоряющую структуру в тормозящей фазе и после двух циклов торможений попадает в поглотитель. Второй лазер был введён в эксплуатацию в 2009 году. Для работы третьего лазера, генерация излучения на котором была впервые достигнута в 2015 году, используются все четыре горизонтальные дорожки ускорителя.

Основные параметры ускорителя и электронного пучка, общие для всех трех УР, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры ускорителя

Энергия инжекции, МэВ	2,0
Набор энергии в ускоряющей структуре, МэВ	11,0
Заряд электронного сгустка, нКл	1,5
Нормализованный эмиттанс, мм·мрад	30,0
Частота ВЧ генераторов, МГц	180,4
Максимальная частота повторения, МГц	90,2

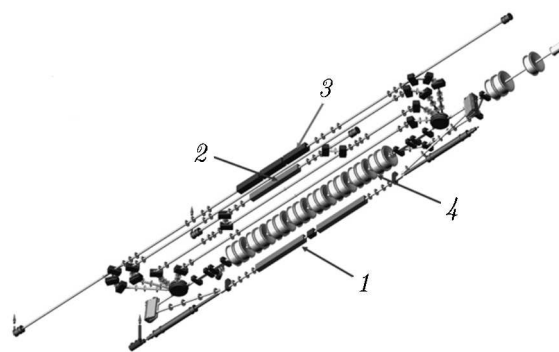


Рис. 2. Схема Новосибирского ускорителя-рекуператора с тремя лазерами на свободных электронах (вид снизу): 1 — первый ЛСЭ, 2 — второй ЛСЭ, 3 — третий ЛСЭ, 4 — общая для всех лазеров ускоряющая структура

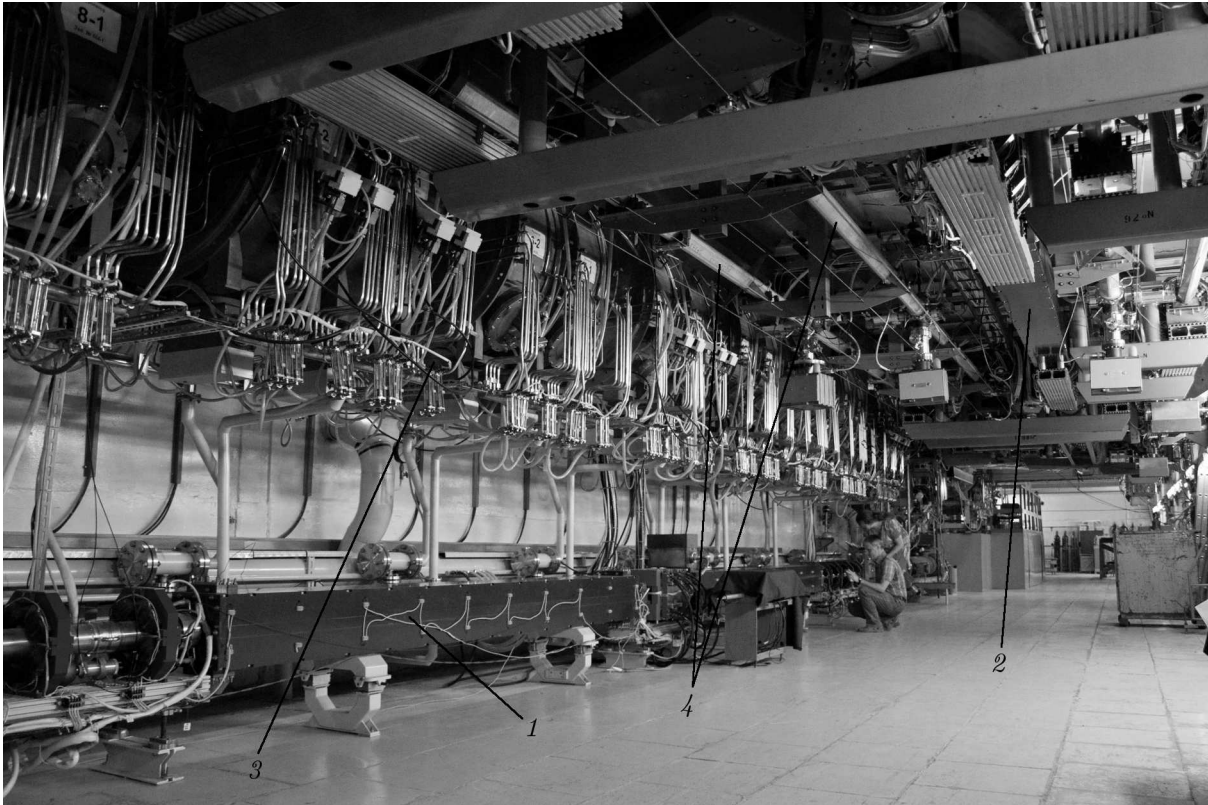


Рис. 3. Расположение элементов установки в ускорительном зале: 1 и 2 — ондуляторы 1-го и 2-го ЛСЭ соответственно, 3 — ускоряющая структура, 4 — горизонтальные дорожки

В зависимости от числа оборотов максимальная конечная энергия электронов составляет 12, 22 или 42 МэВ. Длительность электронного сгустка на последней дорожке в однооборотном УР равняется примерно 100 пс. В двух- и четырёхоборотном УР сгусток сжимается в продольном направлении до $10 \div 20$ пс. В однооборотном УР был получен максимальный средний ток 30 мА, что в настоящее время является мировым рекордом.

Одно существенное отличие Новосибирского УР от других установок [9, 10] заключается в использовании нормально проводящих низкочастотных резонаторов. Это, с одной стороны, приводит к увеличению размера ускоряющей структуры, но, с другой стороны, позволяет повысить продольный и поперечный акцептанс и в результате использовать более длинные сгустки электронов с большим поперечным эмиттансом.

Расположение различных частей установки в ускорительном зале показано на рис. 3.

2. ОПИСАНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

2.1 Первый лазер на свободных электронах

Первый ЛСЭ включает в себя два электромагнитных ондулятора с периодом 12 см, группирователь и оптический резонатор. Форма полюсов ондулятора выбрана таким образом, чтобы обеспечить одинаковую фокусировку пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях. Согласованная бета-функция ондулятора составляет величину около 1 м. Группирователь установлен между ондуляторами и используется для подстройки относительной фазы пучка и излучения. Резонатор состоит из двух медных зеркал, покрытых золотом. Расстояние между зеркалами

составляет 26,6 м, что соответствует частоте повторения 5,64 МГц. Излучение выводится через отверстие в центре зеркал. Канал для вывода импульсов излучения отделён от вакуумной камеры алмазным окном и заполнен сухим азотом.

Данный ЛСЭ является источником когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны в диапазоне 90÷240 мкм. Излучение генерируется в виде последовательности импульсов с длительностью 40÷100 пс и частотой повторения 5,6÷22,4 МГц. Максимальная средняя мощность составляет 500 Вт, а пиковая превосходит 1 МВт [11]. Относительная минимальная измеренная ширина линии составляет 0,3 %, что близко к пределу, получаемому по преобразованию Фурье.

2.2. Второй лазер на свободных электронах

Второй ЛСЭ включает в себя электромагнитный ондулятор с периодом 12 см и оптический резонатор. Ондулятор установлен на байпасе второй дорожки, где энергия электронов достигает 22 МэВ. Диапазон перестройки длины волны этого ЛСЭ составляет 35÷80 мкм. Ондулятор имеет практически такую же конструкцию, как и ондуляторы первого ЛСЭ, но в нём за счёт уменьшения апертуры увеличена амплитуда магнитного поля. Длина оптического резонатора составляет величину около 20 м. Частота повторения импульсов, соответствующая этой длине, равна 7,5 МГц. Впервые генерация на этом ЛСЭ была достигнута в 2009 году. Коэффициент усиления ЛСЭ на длине волны 50 мкм превышает 40 %, а потери излучения в оптическом резонаторе за один проход на данной длине волны равняются примерно 5 %. Это позволило достичь генерацию при частоте повторения электронных сгустков (около 1 МГц), равной 1/8 основной частоты оптического резонатора.

При генерации возникают существенные потери пучка, вызванные дополнительным разбросом электронов по энергии. Для уменьшения этих потерь в некоторые квадрупольные линзы были установлены секступольные корректоры, которые позволяют сделать 180-градусные повороты ахроматическими во втором порядке. Это увеличивает энергетический акцептанс для использованного электронного пучка.

Мощность излучения составляет 0,5 кВт при среднем токе пучка 9 мА. В будущем в этом ЛСЭ планируется использовать новый тип ондулятора с переменным периодом [12], что позволит расширить диапазон перестройки длины волны.

2.3. Третий лазер на свободных электронах

Благодаря тому, что пучок в УР третьего ЛСЭ ускоряется четыре раза, энергия электронов здесь составляет 42 МэВ. В данном ЛСЭ используются три ондуляторные секции по 28 периодов, которые установлены на четвёртой дорожке, как показано на рис. 4. Каждая секция является ондулятором на постоянных магнитах с переменным зазором. Диапазон перестройки длины волны этого ЛСЭ будет составлять 5÷20 мкм. Оптический резонатор имеет длину 40 м и состоит из двух медных зеркал (рис. 5).

В настоящее время излучение выводится через отверстия в зеркалах, но в будущем планируется использовать схему электронного вывода, показанную на рис. 6 [13]. В этой схеме используется ондулятор, который состоит из трёх секций. В первой секции под действием излучения, запасённого в оптическом резонаторе, происходит модуляция плотности электронного пучка с периодом, равным длине волны излучения. Во вторую секцию пучок попадает после ахроматического поворота на небольшой угол. Когерентное излучение, которое возникает в этой секции, направлено под углом к оси оптического резонатора и может быть легко выведено за его пределы при помощи дополнительного зеркала. Третья секция служит для управления связью пучка с модой резонатора.

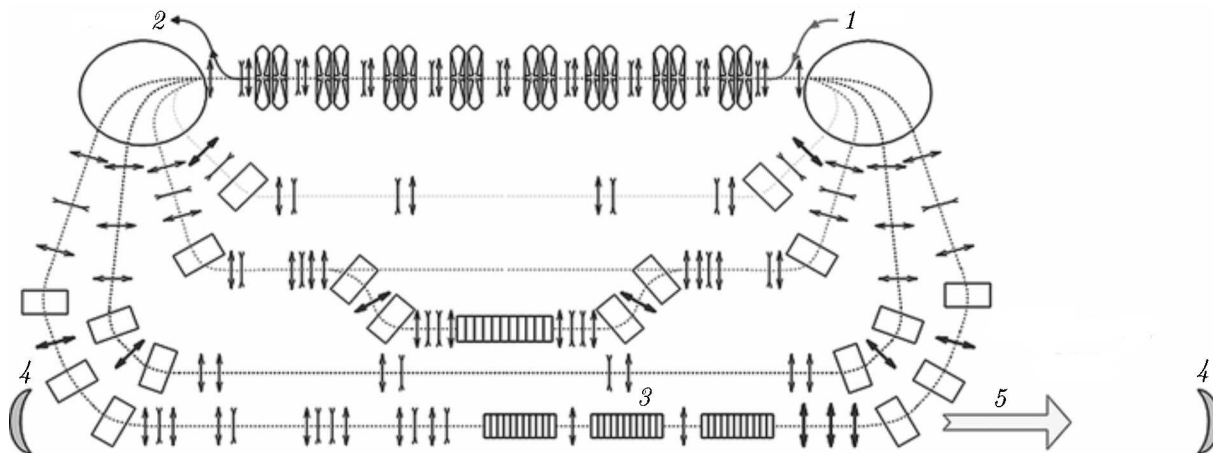


Рис. 4. Схема третьего ЛСЭ с ондуляторами и оптическим резонатором: 1 — инжектор, 2 — обработанный пучок, 3 — ондуляторы, 4 — зеркала оптического резонатора, 5 — излучение ЛСЭ

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАПУСКА ТРЕТЬЕГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ



Рис. 5. Блок зеркала оптического резонатора

Излучение всех трёх ЛСЭ выводится на одни и те же пользовательские станции. Переключение между ними осуществляется при помощи выводных зеркал (см. рис. 7). Основные параметры всех трёх ЛСЭ приведены в табл. 2. Для 3-го ЛСЭ в скобках указаны проектные параметры.

Для получения генерации на третьем ЛСЭ было необходимо решить ряд физических и технических проблем. Основная задача заключалась в получении высокой степени рекуперации электронного пучка в многооборотном ускорителе-рекуператоре. Без решения этой задачи невозможно было увеличить частоту повторений электронных сгустков до основной частоты оптического резонатора (3,75 МГц). Настройка магнитной системы ускорителя позволила снизить поте-

ри пучка до 10%, причём основная часть этих потерь приходится на последний этап торможения при достаточно низкой энергии. В результате был получен средний ток 3,2 мА. Как уже упоминалось выше, сложность решения данной задачи связана с тем, что промежуточные дорожки ускорителя используются как для ускоряемого, так и для замедляемого пучка. Это делает невозможным независимую настройку магнитной системы для последнего. Одно из решений заключается в том, чтобы сделать фокусировку замедляемого пучка зеркально симметричной относительно центра ускорителя, выполнив магнитную систему промежуточных дорожек соответствующим образом и правильно настроив оптическую систему на последней дорожке.

Другая проблема была связана с юстировкой 40-метрового оптического резонатора. Расстояние между зеркалами нужно было выдержать с точностью 0,3 мм. Также необходимо было провести пучок через ондулятор вдоль оси оптической моды резонатора с субмиллиметровой точностью. Датчики положения в этом месте не обеспечивают необходимого разрешения, поэтому

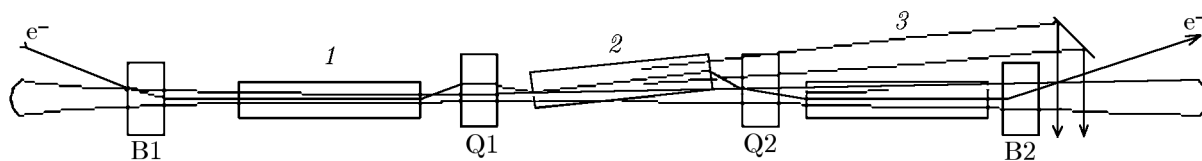


Рис. 6. Схема электронного вывода излучения. В секции ондулятора 1 происходит модуляция плотности пучка на длине волны излучения, в секции 2 — генерация когерентного излучения под углом к оси оптического резонатора, секция 3 служит для управления связью пучка с модой резонатора

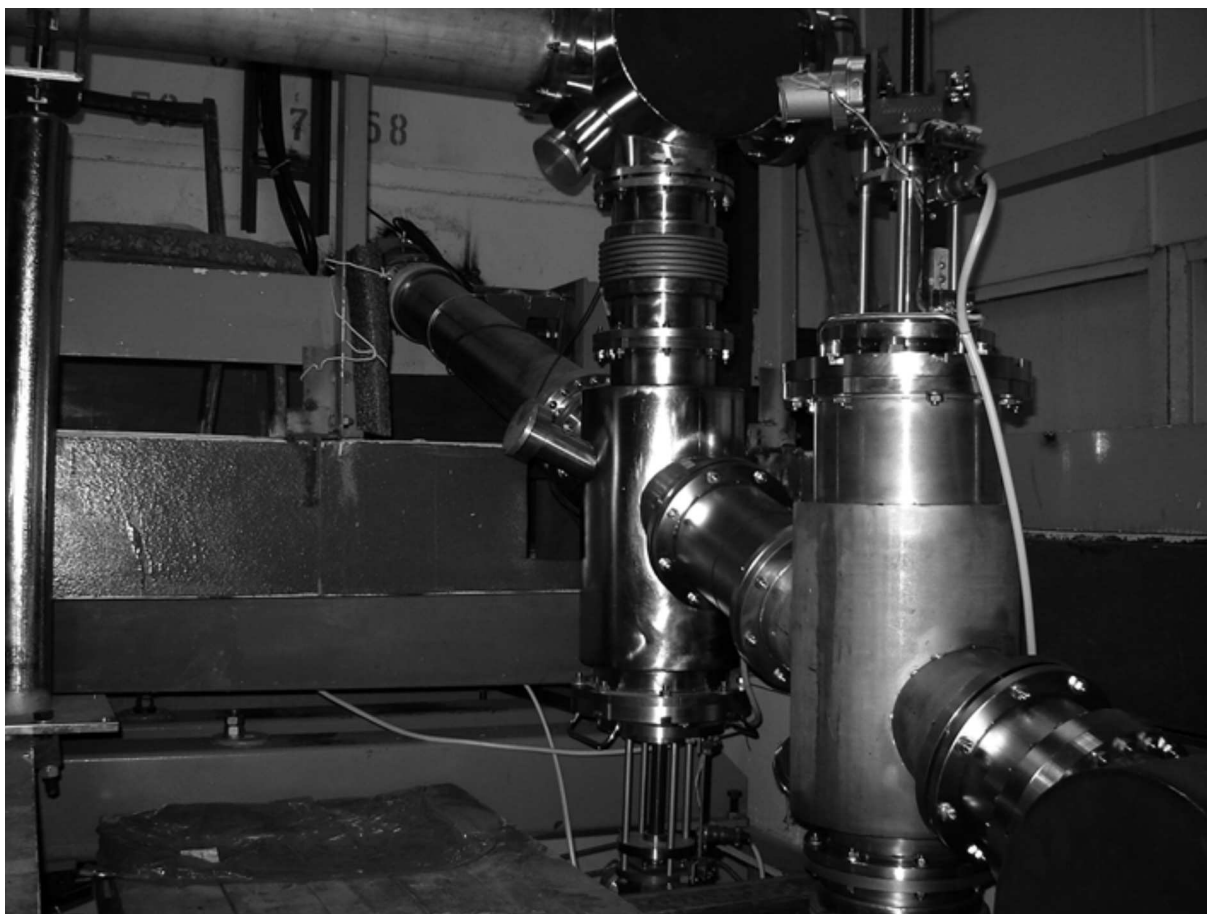


Рис. 7. Канал вывода излучения с блоками выдвигаемых зеркал, осуществляющих переключение между первым, вторым и третьим ЛСЭ

Таблица 2. Основные параметры ЛСЭ

Параметры	1-й ЛСЭ	2-й ЛСЭ	3-й ЛСЭ
Энергия электронов, МэВ	12	22	42(46)
Средний ток, мА	307	10	3(50)
Длина волны, мкм	90,240	35,80	9(5,20)
Мощность излучения, кВт	0,5	0,5	0,1(5)
Электронный КПД, %	0,6	0,3	0,2(0,5)

траектория корректируется таким образом, чтобы отсутствовало отклонение пучка квадрупольными линзами.

После решения всех указанных проблем достижения генерации становится элементарной задачей. Впервые генерация на данном ЛСЭ была получена в 2015 году. Тогда также были измерены мощность (100 Вт) и длина волны (9 мкм) излучения. Возможные будущие эксперименты на данном ЛСЭ включают в себя исследование селективных фотохимических реакций, инфракрасный лазерный катализ и разделение изотопов.

4. БЛИЖАЙШИЕ ПЛАНЫ

Ближайшие планы, связанные с работой на третьем ЛСЭ, включают в себя улучшение радиационной защиты ускорительного зала, установку системы дистанционного управления ондуляторами и зеркалами этого ЛСЭ и вывод его излучения на существующие пользовательские станции. Также необходимо уменьшить потери электронов, повысить средний ток пучка и увеличить электронный коэффициент полезного действия ЛСЭ. Для этого необходимо улучшить качество пучка в инжекторе за счёт повышения напряжения на электростатической пушке и оптимизации режима работы магнитной системы. В более отдалённой перспективе планируется спроектировать и изготовить канал инжекции из высокочастотной пушки, а также сделать и установить зеркало и окно для демонстрации электронного вывода излучения из третьего ЛСЭ. На оставшихся двух ЛСЭ продолжатся регулярные исследовательские и прикладные работы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Murphy J. B., Pellegrini C. // *Frontiers of Particle Beams*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1988. P. 163.
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. 64 с.
4. Cohn K., Blan J., Colson W. B., et al. // *Proc. FEL2015*. Daejeon, Korea, 23–28 August 2015. P. 625.
5. Bratman V. L., Glyavin M. Yu., Kalynov Yu. K., et al. // *Int. J. IRMM & THz Waves*. 2011. V. 32. P. 371.
6. Гершензон Е. М., Голант М. Б., Негирев А. А., Савельев В. С. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. М.: Радио и связь, 1985. 135 с.
7. Socol Y., Kulipanov G. N., Matveenko A. N., et al. // *Phys. Rev. Spec. Top.-Accel. Beams*. 2011. V. 14, No. 4. Art. no. 040702.
8. Antokhin E., Akberdin R. R., Arbutov V. S., et al. // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A. Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 2004. V. 528, No. 1. P. 15.
9. Neil G. R., Bohn C. L., Benson S. V., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84, No. 4. P. 662.
10. Minehara E. J. // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 2002. V. 483, No. 1. P. 8.
11. Kulipanov G. N., Bagryanskaya E. G., Chesnokov E. N., et al. // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2015. V. 5, No. 5. P. 798.
12. Davidyuk I., Shevchenko O. A., Tcheskidov V. G., Vinokurov N. A. // *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2016. V. 19, No. 2. Art. no. 020701.

13. Matveenko A., Shevchenko O. A., Tcheskidov V. G., Vinokurov N. A. // Proc. FEL2007. Novosibirsk, Russia, 26–31 August 2007. P. 204.

Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.; принята в печать 28 июня 2016 г.

NOVOSIBIRSK FREE ELECTRON LASER: RECENT ACHIEVEMENTS AND FUTURE PROSPECTS

O. A. Shevchenko, V. S. Arbuzov, N. A. Vinokurov, P. D. Vobly, V. N. Volkov, Ya. V. Getmanov, I. V. Davidyuk, O. I. Deychuly, E. N. Dementyev, B. A. Dovzhenko, B. A. Knyazev, E. I. Kolobanov, A. A. Kondakov, V. R. Kozak, E. V. Kozyrev, V. V. Kubarev, G. N. Kulipanov, E. A. Kuper, I. V. Kuptsov, G. Ya. Kurkin, S. A. Krutikhin, L. E. Medvedev, S. V. Motygin, V. K. Ovchar, V. N. Osipov, V. M. Petrov, A. M. Pilan, V. M. Popik, V. V. Repkov, T. V. Salikova, I. K. Sedlyarov, S. S. Serebnyakov, A. N. Skrinsky, S. V. Tararyshkin, A. G. Tribendis, V. G. Cheskidov, K. N. Chernov, and M. A. Shcheglov

Free electron lasers (FEL) are unique sources of electromagnetic radiation with tunable wavelength. A high-power FEL has been created at the G.I. Budker Institute for Nuclear Physics. Its radiation frequency can be tuned over a wide range in the terahertz and infrared spectrum regions. As a source of electron bunches this FEL uses a multi-turn energy-recovery linac, which has five straight sections. Three sections are used for three FELs which operate in different wavelength ranges (90–240 μm for the first, 37–80 μm for the second, and 5–20 μm for the third ones). The first and the second FELs were commissioned in 2003 and 2009, respectively. They are used for various applied and research problems now. The third FEL is installed on the last, forth accelerator track, in which the electron energy is the maximum. It comprises three undulator sections and a 40 m optical cavity. The first lasing of this FEL was obtained in the summer of 2015. The radiation wavelength was 9 μs and the average power was about 100 W. The design power is 1 kW at a pulse repetition rate of 3.75 MHz. Radiation of the third FEL will be delivered to user stations from the protected hall in the near future. The third FEL commissioning results are presented and the current status of the first and second FELs as well as their future development prospects are described.