

УДК 621.384.6;621.373

НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

© 2019 г. О. А. Шевченко^{1, *}, Н. А. Винокуров^{1, 2}, В. С. Арбузов¹, К. Н. Чернов¹, И. В. Давидюк^{1, 2}, О. И. Дейчули¹, Е. Н. Дементьев¹, Б. А. Довженко¹, Я. В. Гетманов^{1, 2}, Я. И. Горбачев¹, Б. А. Князев^{1, 2}, Е. И. Колобанов¹, А. А. Кондаков¹, В. Р. Козак¹, Е. В. Козырев^{1, 2}, С. А. Крутихин¹, В. В. Кубарев^{1, 2}, Г. Н. Кулипанов¹, Е. А. Купер¹, И. В. Купцов¹, Г. Я. Куркин¹, Л. Э. Медведев¹, С. В. Мотыгин¹, В. К. Овчар¹, В. Н. Осипов¹, В. М. Петров¹, А. М. Пилан¹, В. М. Попик¹, В. В. Репков¹, Т. В. Саликова¹, М. А. Щеглов¹, И. К. Седяров¹, С. С. Середняков^{1, 2}, А. Н. Скринский¹, С. В. Тарарышкин¹, А. Г. Трибендис^{1, 3}, В. Г. Ческидов¹, П. Д. Воблый¹, В. Н. Волков¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: O.A. Shevchenko@inp.nsk.su

Комплекс “Новосибирский ЛСЭ” включает в себя три лазера на свободных электронах (ЛСЭ), которые установлены на первой, второй и четвертой дорожках многооборотного ускорителя рекуператора (УР). Длина волны излучения первого ЛСЭ перестраивается в диапазоне 90–240 мкм. Излучение данного ЛСЭ состоит из периодической последовательности коротких импульсов, следующих друг за другом с частотой повторения 5.6 или 11.2 МГц. Средняя мощность излучения может достигать значения 0.5 кВт, а пиковая – 1 МВт. Второй ЛСЭ работает в диапазоне длин волн 40–80 мкм. Частота повторения импульсов излучения составляет 7.5 МГц, а значения средней и пиковой мощностей совпадают с первым ЛСЭ. В настоящее время первые два ЛСЭ в своих диапазонах длин волн являются самыми мощными в мире (по величине средней мощности) источниками когерентного узкополосного излучения (с шириной линии менее 1%). Третий ЛСЭ был введен в эксплуатацию в 2015 г. Его диапазон длин волн составляет 5–20 мкм. Новосибирский УР является первым и единственным в мире многооборотным ускорителем-рекуператором. Он обладает рядом отличительных особенностей, которые включают в себя использование ускоряющей структуры с нормально проводящими резонаторами, работающими на частоте 180 МГц, использование электростатической электронной пушки с термокатодом и управляющей сеткой, три возможных конфигурации включения магнитной системы и довольно компактные (6×40 м) размеры. В терагерцевом диапазоне Новосибирский ЛСЭ работает на пользователей с 2004 г.

DOI: 10.1134/S0367676519020273

УСКОРИТЕЛЬ

Комплекс Новосибирский ЛСЭ [1, 2] включает в себя три лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Ондюляторы всех трех ЛСЭ установлены на разных дорожках одного и того же многооборотного ускорителя-рекуператора (УР). Упрощенная схема четырех оборотов УР показана на рис. 1. Из инжектора 1 электроны с низкой энергией направляются в высокочастотную ускоряющую структуру 2. После четырех прохождений ускоряющей структуры электроны попадают на последнюю дорожку и теряют небольшую часть своей энергии в ондуляторе ЛСЭ 4. Использованный электронный пучок замедляется в той же ускоряющей структуре и попадает в поглотитель 5, уже имея низкую энергию.

В качестве источника электронов используется электростатическая пушка с катодно-сеточ-

ным узлом. Напряжение, приложенное к ускорительной трубке пушки, составляет 300 кВ. Данная пушка позволяет получать электронные сгустки

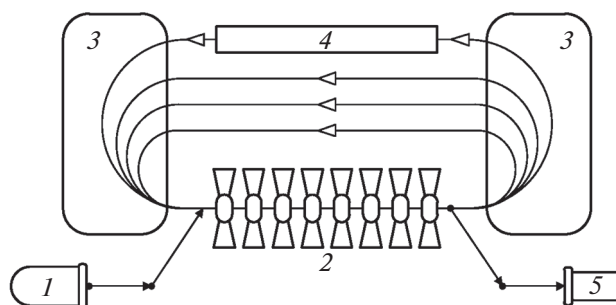


Рис. 1. Упрощенная схема многооборотного УР: 1 – инжектор, 2 – ускоряющая структура, 3 – поворотные магниты, 4 – ондулятор, 5 – поглотитель

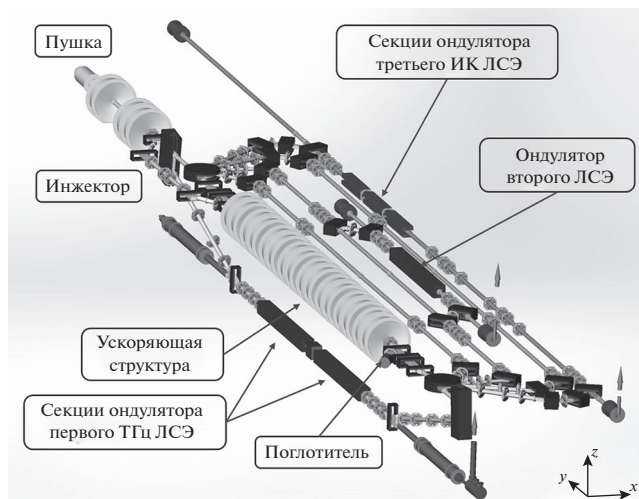


Рис. 2. Новосибирский УР с тремя ЛСЭ (вид сверху).

длительностью 1 нс, зарядом до 1.5 нКл и нормализованным эмиттансом около 20 микрон. Частота повторения сгустков может меняться от 0 до 22.5 МГц. После группирующего резонатора, работающего на частоте 180.4 МГц, сгустки сжимаются в пустом промежутке длиной около 3 м, ускоряются двумя ускоряющими резонаторами до энергии 2 МэВ, проходят через инжекционный канал и инжектируются в основную ускоряющую структуру УР (см. рис. 2).

Ускоряющая структура состоит из 16 нормально проводящих высокочастотных резонаторов, присоединенных к двум волноводам. Рабочая частота резонаторов составляет 180.4 МГц. Низкая частота позволяет работать с длинными сгустками и большими токами пучка.

Новосибирский УР имеет три основных конфигурации включения магнитной системы – по одной на каждый из трех ЛСЭ. Первый ЛСЭ установлен внизу под ускоряющей структурой (см. рис. 2 и 4). Поэтому после прохождения через ускоряющую структуру электронный пучок с энергией 11 МэВ поворачивается на 180 градусов в вертикальной плоскости. После использования в ЛСЭ пучок возвращается в ускоряющую структуру в замедляющей фазе. В данной конфигурации УР работает как однооборотная установка.

Для работы со вторым и третьим ЛСЭ необходимо включить два круглых поворотных магнита. Они поворачивают пучок в горизонтальной плоскости, как показано на рис. 2. После четырех ускорений в основной ускоряющей структуре электронный пучок попадает в ондулятор третьего ЛСЭ. Энергия электронов в третьем ЛСЭ составляет 42 МэВ. Использованный пучок замедляется четыре раза и приходит в поглотитель, уже имея низкую энергию.

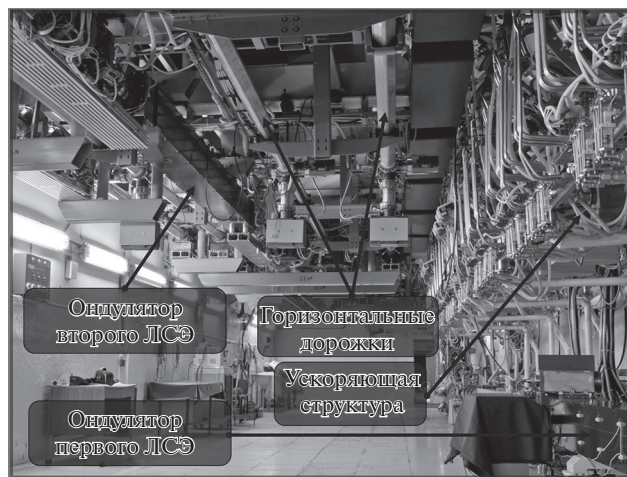


Рис. 3. Ускорительный зал.

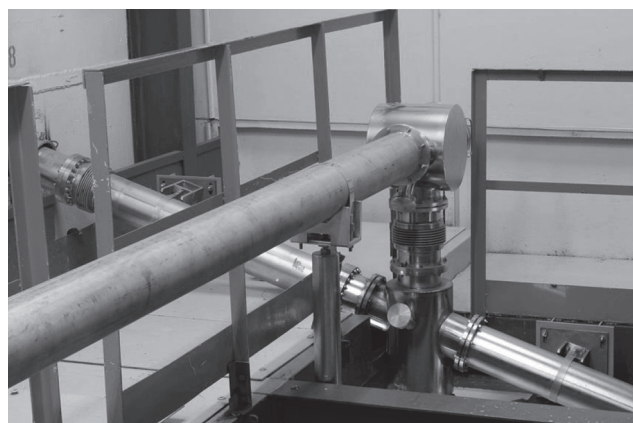


Рис. 4. Оптические каналы вывода излучения ЛСЭ. Излучение всех ЛСЭ выводится на одни и те же пользовательские станции. Переключение между ЛСЭ осуществляется за счет убирающихся зеркал.

При включенных четырех поворотных магнитах, расположенных на второй дорожке (см. рис. 2), пучок с энергией 20 МэВ проходит через ондулятор второго ЛСЭ. После этого, благодаря правильно подобранной длине дорожки, пучок попадает в ускоряющую структуру в замедляющей фазе и после двух торможений теряется в поглотителе.

Фотография ускорительного зала, на которой видны ускоряющая структура и ондуляторы ЛСЭ, представлена на рис. 3.

Следует отметить, что все 180-градусные повороты являются ахроматическими (на первой и второй горизонтальных дорожках – ахроматическими во втором порядке), но не изохронными. Данное обстоятельство позволяет настраивать продольную динамику пучка с целью повышения пикового тока в ЛСЭ и оптимизации торможения использованного пучка.

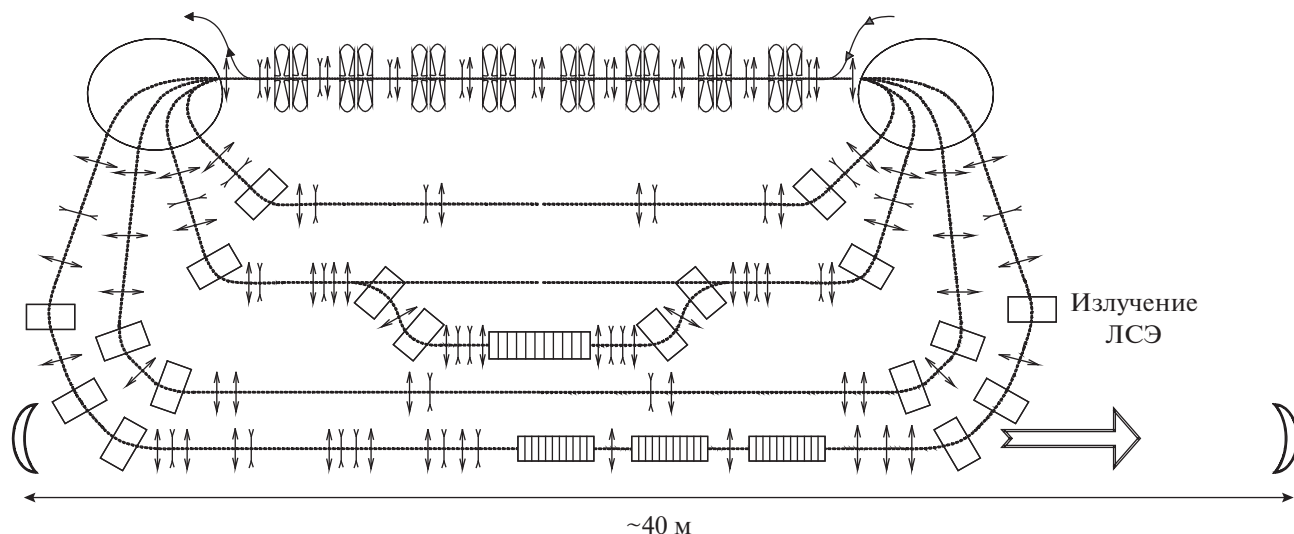


Рис. 5. УР с ондуляторами и оптическим резонатором третьего ЛСЭ.

ЛСЭ

Первый ЛСЭ был введен в эксплуатацию в 2003 году [3]. Он является источником узкополосного (с шириной линии менее 1%) терагерцевого излучения, перестраиваемого в диапазоне длин волн 80–240 мкм, со средней мощностью до 0.5 кВт и пиковой мощностью до 1 МВт (импульсы с длительностью 100 пс и частотой повторения 5.6 МГц). В прошлом году было выполнено около 30 исследовательских проектов в разных областях науки с использованием излучения данного ЛСЭ [4–9].

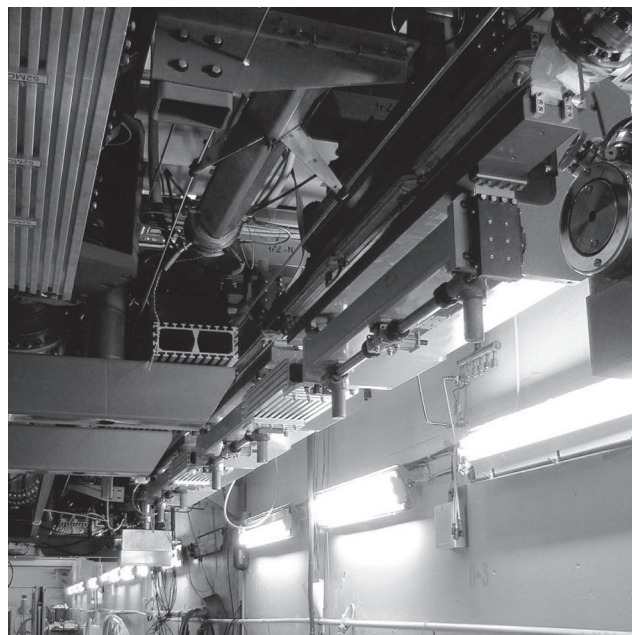


Рис. 6. Ондуляторы третьего ЛСЭ.

Излучение всех трех ЛСЭ выводится на одни и те же пользовательские станции по оптическому каналу, заполненному сухим азотом. Система переключения излучения от разных ЛСЭ показана на рис. 4.

Второй ЛСЭ генерирует узкополосное излучение (с шириной линии менее 1%) в дальнем инфракрасном диапазоне длин волн 40–80 мкм со средней мощностью до 0.5 кВт и пиковой мощностью до 1 МВт (импульсы длительностью 50 пс и частотой повторения 7.5 МГц). В ближайшем будущем планируется поменять старый электромагнитный ондулятор на новый ондулятор с переменным периодом [10, 11]. Это позволит существенно расширить диапазон перестройки длины волны.

Ондулятор третьего ЛСЭ установлен на четвертой дорожке, как показано на рис. 5 и 6. Весь ондулятор состоит из трех секций по 28 периодов. Каждая секция является отдельным ондулятором на постоянных магнитах с периодом 6 см и переменным зазором. Зазоры настраиваются независимо, поэтому средняя секция также может использоваться для фазировки двух крайних. Диапазон перестройки длины волны в данном ЛСЭ составляет 5–20 мкм.

Длина оптического резонатора третьего ЛСЭ составляет около 40 м. Резонатор состоит из двух медных зеркал. В настоящее время излучение из резонатора выводится через отверстия в центре зеркал. Мы также планируем на этом ЛСЭ реализовать схему электронного вывода [12] (см. рис. 7). В данной схеме пучок группируется в первом ондуляторе за счет взаимодействия с внутррезонаторным излучением, затем при помощи ахроматического поворота он отклоняется в поперечном направлении на небольшой угол так, что его излучение из

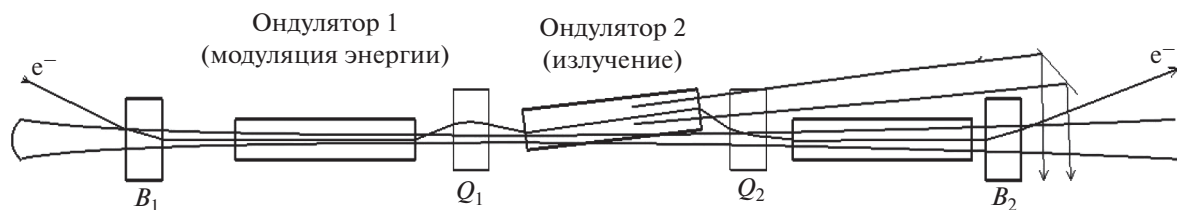


Рис. 7. Схема электронного вывода излучения.

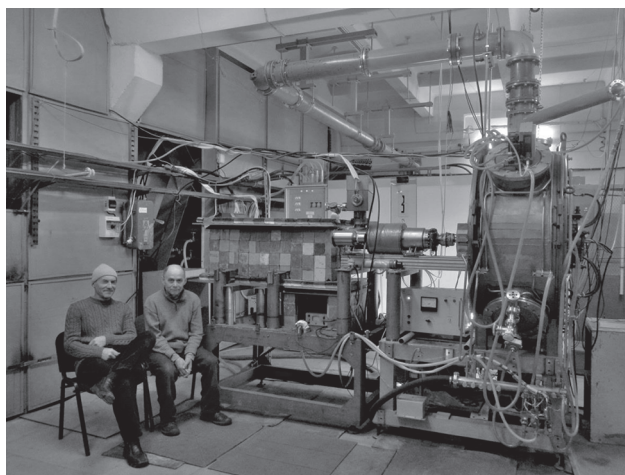


Рис. 8. Новая ВЧ-пушка для Новосибирского УР.

второго ондулятора выходит под углом к оси оптического резонатора мимо переднего зеркала. Необходимо отметить, что данная схема имеет преимущество только для излучения с большой средней мощностью. Как правило, пользователям большая мощность не требуется, а вывод излучения через отверстия в зеркалах является гораздо более простым.

НОВАЯ ВЧ-ПУШКА

В настоящее время средний ток пучка Новосибирского УР ограничен электронной пушкой. Недавно была собрана и испытана новая ВЧ-пушка [13] (см. рис. 8), которая работает на частоте 90 МГц. На этой пушке был получен средний ток больше 100 мА [14]. Инжекционный канал для ВЧ-пушки планируется собрать на испытательном стенде в этом году.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящее исследование было поддержано грантом 14-50-00080 Российского научного фонда.

Работа была выполнена с использованием инфраструктуры центра коллективного пользования “Сибирский Центр Синхротронного и Терагерцевого Излучения (СЦСТИ)” института ядерной физики им. Будкера СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kulipanov G.N. et al.* // IEEE Trans. on Terahertz Sci. and Technol. 2015. V. 5. № 5. P. 798.
2. *Shevchenko O.A. et al.* // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 13.
3. *Antokhin E. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 2004. V. A 528. № 1. P. 15.
4. *Knyazev B.A. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. № 16. P. 163901.
5. *Choporova Yu.Yu. et al.* // IEEE Trans. on Terahertz Sci. and Technol. 2015. V. 5. № 5. P. 836.
6. *Komlenok M.S. et al.* // Quantum Electronics. 2015. V. 45. № 10. P. 933.
7. *Agafonov A.N. et al.* // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 12. P. 3635.
8. *Chesnokov E.N. et al.* // Chem. Phys. Lett. 2015. V. 636. P. 203.
9. *Gerasimov V.V. et al.* // Opt. Express. 2015. V. 23. № 26. P. 33448.
10. *Vinokurov N.A. et al.* // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2011. V. 14. № 4. P. 040701.
11. *Davidyuk I. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2016. V. 19. P. 020701.
12. *Matveenko A. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 2009. V. A 603. P. 38.
13. *Volkov V. et al.* // Phys. of Part. and Nucl. Lett. 2016. V. 13. № 7. P. 796.
14. *Volkov V. et al.* // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 86.