

ПОЛУЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ НА ПЕРВОМ В МИРЕ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ НА ОСНОВЕ ОНДУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДОМ

*О. А. Шевченко^{а, 1}, Н. А. Винокуров^{а, б}, Я. В. Гетманов^{а, б},
Я. И. Горбачев^а, В. В. Кубарев^а, Л. Э. Медведев^а, М. А. Щеглов^а,
С. С. Середняков^{а, б}, В. Г. Ческидов^а, С. В. Тарарышкин^а,
А. М. Батраков^а, И. В. Ильин^а, К. С. Штро^а*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Ондуляторы с переменным периодом имеют ряд преимуществ перед обычными ондуляторами, но до недавнего времени они не использовались. Летом 2021 г. такой ондулятор был размещен на второй дорожке установки «Новосибирский лазер на свободных электронах», и было получено когерентное излучение в диапазоне 15–120 мкм. Описана конструкция этого ондулятора, а также представлены результаты измерений параметров излучения.

Variable-period undulators have a number of advantages over conventional undulators, but until recently they were not used in free electron lasers (FELs). In the summer of 2021, such an undulator was installed on the second track of the Novosibirsk free electron laser, and lasing in the spectral range 15–120 μm was obtained. The design of this undulator is described and the results of measurements of the radiation parameters are also presented.

PACS: 41.60.Cr; 75.50.Ww

ВВЕДЕНИЕ

Ондуляторы нашли широкое применение как в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ), так и в современных источниках синхротронного излучения (СИ) [1, 2]. Одной из важных характеристик данных источников является диапазон перестройки длины волны. Длина волны первой гармоники излучения ондулятора дается формулой [1, 2]

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad (1)$$

где λ_w — период ондулятора, $K = 93V$ (Тл) λ_w (м) — параметр ондуляторности; γ — релятивистский фактор электронов. Из (1) видно, что длина волны зависит от энергии электронов, амплитуды магнитного поля, а также от периода. Идея конструкции ОПП, которая была реализована в ондуляторе новосибирского ЛСЭ, была предложена

¹E-mail: O.A.Shevchenko@inp.nsk.su

на в работе [3]. Оригинальная модификация такой конструкции — спиральный ОПП — была создана и экспериментально изучена в Корейском институте исследования атомной энергии [4].

Перестройка длины волны за счет изменения периода имеет ряд преимуществ. В частности, уменьшение периода в ОПП не приводит к сильному снижению амплитуды поля, поэтому, используя такой ондулятор, можно получить больший диапазон перестройки длины волны, чем в обычном ондуляторе. Ондуляторы с плавно перестраиваемым периодом ранее не использовались в действующих установках. Новосибирский ЛСЭ [5] является первым в мире примером успешного использования ондулятора такого типа. Ондулятор был установлен на байпасе второй дорожки ускорителя Новосибирского ЛСЭ летом 2021 г., а уже в сентябре того же года была получена генерация, и достигнут рекордный диапазон перестройки длины волны 15–120 мкм.

КОНСТРУКЦИЯ ОНДУЛЯТОРА

В конструкции, которая была использована для новосибирского ЛСЭ, ондулятор составлен из отдельных одинаковых магнитных блоков (рис. 1, а), которые установлены на направляющей и могут свободно передвигаться в продольном направлении.

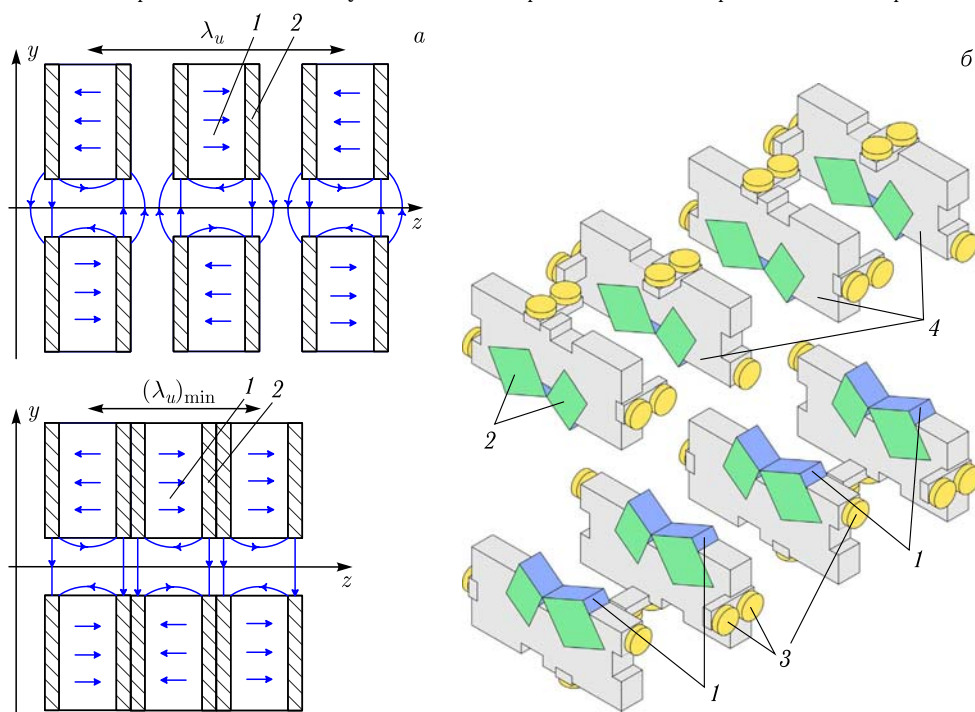


Рис. 1 (цветной в электронной версии). а) Общая схема ондулятора с переменным периодом при двух различных периодах: 1 — постоянный магнит, 2 — железная накладка. Синими стрелками показано направление магнитной индукции. б) Трехмерная модель и расположение кассет. Синим цветом (1) показаны постоянные магниты, зеленым (2) — железные полюсные накладки, желтым (3) — шариковые подшипники, серым (4) — алюминиевые корпуса кассет

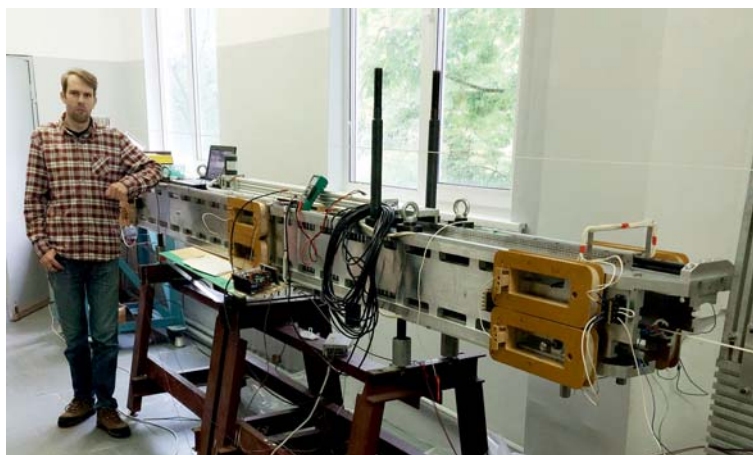


Рис. 2. Ондюлятор, установленный на стенде магнитных измерений. В середине и на концах ондюлятора видны обмотки коррекции магнитного поля

Каждый блок состоит из постоянного магнита *1* и прикрепленных к нему железных полюсных накладок *2*. Как видно из этого рисунка, такой ондюлятор представляет собой обычный гибридный ондюлятор [2], полюса которого состоят из двух одинаковых частей (полюсных накладок), разделенных воздушным зазором. Между соседними блоками действует отталкивающая сила (давление магнитного поля), которая в отсутствие трения приводит к равномерному продольному распределению блоков в средней части ондюлятора.

Корпус ондюлятора выполнен из алюминиевого сплава 6061-T6 (рис. 2). Внутри корпуса имеются пазы, вдоль которых могут свободно перемещаться кассеты с установленными в них магнитами (см. рис. 1, б). Кассеты опираются на подшипники. В каждой кассете установлено два магнита $40 \times 40 \times 20$ мм на основе сплава NdFeB с величиной коэрцитивной силы 13 кЭ. На магниты установлены стальные полюсные накладки толщиной 2 мм. Подробное описание расчетов магнитного поля и оптимизации геометрии ондюлятора представлено в работе [6].

По краям ондюлятора кассеты удерживаются с помощью толкателей, которые приводятся в движение приводами, установленными на верхней и нижней крышках ондюлятора.

Конструкция ондюлятора позволяет относительно быстро менять число периодов путем добавления либо извлечения кассет. При минимальном периоде максимально допустимое число периодов составляет 70, что позволяет иметь достаточно высокий коэффициент усиления ЛСЭ, необходимый для получения генерации в коротковолновой области спектра.

ПОЛУЧЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Ондюлятор был установлен на байпасе второй дорожки новосибирского ЛСЭ летом 2021 г., а 14 сентября того же года была получена первая генерация на длине волны 26 мкм. В течение относительно короткого промежутка времени были настроены

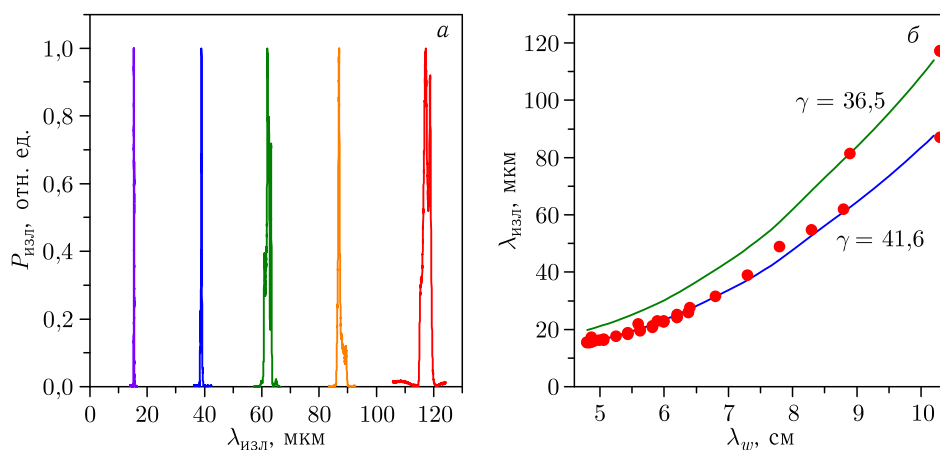


Рис. 3. Измеренные спектры излучения в различных областях диапазона перестройки (а) и измеренная зависимость длины волны от периода ондулятора (б). Сплошными линиями показана теоретическая зависимость длины волны от периода для двух разных энергий электронов

режимы для генерации в коротковолновой и длинноволновой областях спектра, и в конечном итоге диапазон перестройки длины волны составил 15–120 мкм, что оказалось лучше, чем ожидаемый диапазон 15–85 мкм.

На рис. 3, а представлены спектры излучения, измеренные в разных областях диапазона перестройки. Точные измерения абсолютной мощности излучения пока не проводились, поэтому спектры нормированы на максимум. На рис. 3, б показана измеренная зависимость длины волны от периода ондулятора, которая хорошо согласуется с теоретической формулой (1).

Помимо спектральных характеристик на минимальной полученной длине волны 15 мкм были измерены коэффициент усиления ЛСЭ — 7,2% и потери излучения за проход в оптическом резонаторе — 3,8%. Измерения проводились в режиме модуляции мощности [7] с использованием быстрого детектора. Коэффициенты усиления и потери определялись по времени нарастания и затухания мощности излучения, измеренной детектором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение генерации на ондуляторе с переменным периодом является важным достижением с точки зрения улучшения параметров установки новосибирский ЛСЭ — расширение диапазона перестройки длины волны открывает новые возможности для пользователей. В то же время это достижение имеет большое значение и с точки зрения перспектив создания новых ондуляторов такого типа, поскольку оно демонстрирует работоспособность данных устройств.

Следует отметить, что минимальный период описанного ондулятора (48 мм) меньше его апертуры (50 мм). Так как при изменении всех размеров системы с постоянными магнитами амплитуда магнитного поля не меняется. Для современных источников синхротронного излучения, имеющих апертуры менее 10 мм, можно использовать ОПП похожей конструкции с периодом менее 10 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clarke J. A.* The Science and Technology of Undulators and Wigglers. New York: Oxford Univ. Press, 2004.
2. *Винокуров Н. А., Левичев Е. Б.* Ондуляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений // УФН. 2015. Т. 185, № 9. С. 917;
Vinokurov N. A., Levichev E. B. // Phys. Usp. 2015. V. 58. No. 9. P. 850.
3. *Vinokurov N. A., Shevchenko O. A., Tcheskidov V. G.* Variable-Period Permanent Magnet Undulators // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2011. V. 14, No. 4. P. 040701.
4. *Mun J., Jeong Y. U., Vinokurov N. A., Lee K., Jang K. H., Park S. H., Jeon M. Y., Shin S. I.* Variable-Period Permanent-Magnet Helical Undulator // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2014. V. 17, No. 8. P. 080701.
5. *Shevchenko O. A., Vinokurov N. A., Arbuzov V. S., Chernov K. N., Deichuly O. I., Dementyev E. N., Dovzhenko B. A., Getmanov Ya. V., Gorbachev Ya. I., Knyazev B. A., Kondakov A. A., Kozak V. R., Kozyrev E. V., Krutikhin S. A., Kubarev V. V., Kulipanov G. N., Kuper E. A., Kuptsov I. V., Kurkin G. Ya., Medvedev L. E., Motygin S. V., Ovchar V. K., Osipov V. N., Petrov V. M., Pilan A. M., Popik V. M., Repkov V. V., Salikova T. V., Scheglov M. A., Sedlyarov I. K., Serednyakov S. S., Skrinsky A. N., Tararyshkin S. V., Tribendis A. G., Tcheskidov V. G., Volkov V. N.* The Novosibirsk Free Electron Laser Facility // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299, No. 1. P. 20001.
6. *Davidyuk I. V., Shevchenko O. A., Tcheskidov V. G., Vinokurov N. A.* Modeling and Designing of Variable-Period and Variable-Pole-Number Undulator // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2016. V. 19, No. 2. P. 20701.
7. *Shevchenko O. A., Melnikov A. R., Tararyshkin S. V., Getmanov Ya. V., Serednyakov S. S., Bykov E. V., Kubarev V. V., Fedin M. V., Veber S. L.* Electronic Modulation of THz Radiation at NovoFEL: Technical Aspects and Possible Applications // Materials. 2019. V. 12, No. 19. P. 3063.

Получено 18 ноября 2022 г.