

ИЗМЕРЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ И СОРТИРОВКА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ОНДУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДОМ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

*Я. И. Горбачев^a, О. А. Шевченко^{a,1},
Н. А. Винокуров^{a,б}, Я. В. Гетманов^{a,б}*

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

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН ведутся работы по созданию нового ондулятора с переменным периодом для новосибирского лазера на свободных электронах. Ондулятор имеет увеличенную апертуру, поэтому в нем использованы постоянные магниты нестандартной формы. Описана конструкция измерительного стенда, и представлены предварительные результаты измерений параметров этих магнитов.

A new variable-period undulator for the Novosibirsk free electron laser facility is being developed at the Budker Institute of Nuclear Physics. The undulator has an enlarged aperture, so it uses permanent magnets with nonstandard shape. The design of the measuring stand is described and preliminary results of measurements of the magnet's parameters are presented.

PACS: 07.55.Ge; 75.50.Ww

ВВЕДЕНИЕ

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является уникальным источником когерентного излучения с общим диапазоном перестройки длины волны 8–340 мкм [1]. В составе данного источника имеется три ЛСЭ, ондуляторы которых установлены на разных дорожках многооборотного ускорителя-рекуператора. Первый из этих ЛСЭ работает в терагерцевой области спектра 90–340 мкм. В своем спектральном диапазоне данный ЛСЭ имеет самую высокую в мире среднюю мощность излучения. Он был введен в эксплуатацию в 2003 г. и с тех пор успешно используется для проведения исследований в различных областях науки, включая физику, химию и биологию.

¹E-mail: O. A. Shevchenko@inp.nsk.su

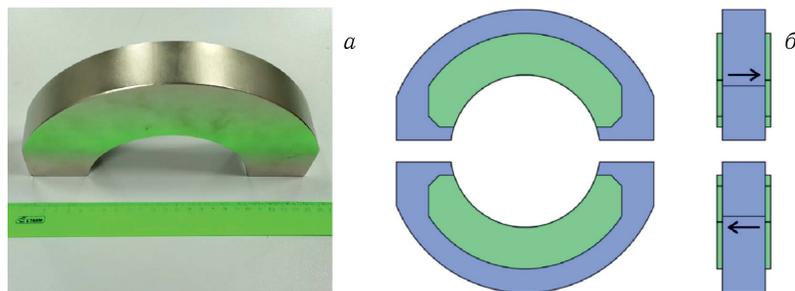


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Фото магнита (а) и схема (б) одного полу периода ондулятора (виды спереди и сбоку). Синим показаны постоянные магниты, зеленым — железные полюса. Стрелками показано направление намагниченности магнитов

В настоящее время в первом ЛСЭ установлен электромагнитный ондулятор, состоящий из двух секций. Подобный ондулятор ранее использовался и во втором ЛСЭ, но летом 2021 г. он был заменен на ондулятор на постоянных магнитах с переменным периодом (ОПП) [2]. В результате такой замены диапазон перестройки длины волны второго ЛСЭ удалось увеличить с 35–80 до 15–120 мкм. Успешный запуск второго ЛСЭ продемонстрировал работоспособность новой конструкции ондулятора и подтвердил целесообразность установки ОПП на первый ЛСЭ. Работа по созданию такого ондулятора для первого ЛСЭ сейчас ведется в Институте ядерной физики СО РАН [3]. Новый ондулятор позволит расширить диапазон перестройки длины волны этого ЛСЭ в длинноволновую область.

Увеличение длины волны приведет к увеличению размера светового пучка в ЛСЭ, поэтому новый ондулятор должен иметь достаточно большую апертуру. В то же время для сохранения коротковолновой границы диапазона перестройки минимальный период ондулятора должен быть достаточно маленьким. Поскольку в новом ондуляторе необходимый минимальный период (10 см) получился меньше его минимально допустимой апертуры (14 см), была проведена оптимизация геометрии ондулятора с целью получения достаточно большой амплитуды магнитного поля на оси. По результатам данной оптимизации форма магнитов была выбрана в виде повернутой буквы «С» с довольно большими габаритами: высотой 120 мм (радиус внешней границы — 130 мм), шириной 240 мм, толщиной 40 мм (рис. 1).

Вес одного магнита составляет 6,25 кг. Основная компонента намагниченности направлена перпендикулярно большой плоской грани магнита. В процессе изготовления магнитов неизбежно появляются ошибки намагниченности, которые могут проявляться как в виде разброса величины основной (продольной) компоненты, так и в появлении дополнительных поперечных компонент. Для контроля качества магнитов был собран измерительный стенд, который позволяет находить все три компонента намагниченности с необходимой точностью.

КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Стандартный метод измерения намагниченности основан на использовании катушек Гельмгольца. В этом методе при помощи интегрирующего вольтметра измеряется

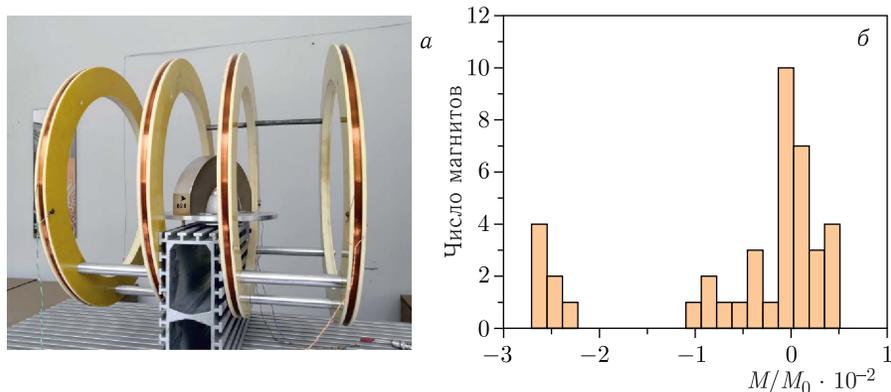


Рис. 2. а) Измерительный стенд с установленным магнитом; б) гистограмма относительных отклонений измеренных величин основной компоненты намагниченности для 40 магнитов

интеграл ЭДС, наводимой в катушке при извлечении магнита, либо его повороте на 180° . Величина измеренного интеграла пропорциональна проекции полного магнитного момента на ось катушек [4, 5].

Метод измерения намагниченности с извлечением магнита из катушки был уже нами успешно использован ранее для сортировки магнитов ОПП второго ЛСЭ [6]. Использование данного метода для новых магнитов осложнено тем, что магниты имеют большую массу и размеры, поэтому было принято решение использовать вариацию этого метода с поворотом магнита на 180° .

Для проведения корректного измерения магнит в своем начальном положении должен полностью помещаться в область однородности магнитного поля катушек. Чтобы уменьшить габариты измерительного стенда при сохранении размеров области однородности вместо катушек Гельмгольца целесообразно использовать катушки Бэкера [7], которые представляют собой четыре соосные катушки одного диаметра, причем число витков во внешних катушках больше, чем во внутренних. При всех начальных положениях магнита, которые используются для измерений, магнит целиком находится в области однородности, внутри которой относительное отклонение поля катушек не превышает $2 \cdot 10^{-3}$, что обеспечивает достаточную точность измеряемых значений намагниченности.

На основе полученных в результате оптимизации размеров катушек был сконструирован измерительный стенд, показанный на рис. 2а.

Катушки намотаны тонким проводом на каркасах, сделанных из текстолита. Радиус катушек составляет 250 мм, ширина намотки — 10 мм, толщина — около 1 мм. Число витков во внешних катушках — 100, во внутренних — 44. Катушки соединяются последовательно и подсоединяются к интегрирующему вольтметру VsDC3, разработанному в ИЯФ СО РАН [8]. Каркасы катушек закреплены на алюминиевом профиле, на котором также расположен поворотный стол. На столе имеются упоры, однозначно фиксирующие положение магнита. Для измерения основной компоненты намагниченности магнит ставится вертикально, а для измерения поперечных компонент магнит кладется на стол горизонтально. Для того чтобы центр масс магнита находился как можно ближе к центру катушек, в случае вертикальной и горизонталь-

ной ориентации магнита используются два разных стола, отличающиеся по высоте. В конструкции предусмотрена регулировка угла поворота, которая осуществляется за счет точной подстройки ограничителей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Стенд с установленным магнитом представлен на рис. 2, *а*. Показанное положение магнита использовалось для измерения основной компоненты намагниченности. Для измерения поперечных компонент магнит располагался горизонтально, причем измерения каждой поперечной компоненты выполнялись при двух положениях магнита с основной компонентой намагниченности, направленной вверх и вниз, а результат усреднялся. Это делалось для того, чтобы исключить вклад в измерение основной компоненты, который может возникать из-за наклона плоскости стола относительно оси катушек.

Были измерены намагниченности 40 магнитов. У всех магнитов величина поперечных компонент намагниченности оказалась в пределах допустимых значений: $\max |\Delta M_x/M_0| \leq 0,4\%$, $\max |\Delta M_y/M_0| \leq 1\%$. Результаты измерений основной компоненты представлены на рис. 2, *б*. Из показанной на этом рисунке гистограммы видно, что параметры 33 магнитов удовлетворяют всем наложенным ограничениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подбирая форму магнитов, можно конструировать ондуляторы с нестандартной геометрией, оптимизированной для определенных применений. Современные технологии позволяют изготавливать магниты произвольной формы с достаточно малым разбросом параметров, что делает возможным их использование в ондуляторах для ЛСЭ. Тем не менее, несмотря на достаточно высокое качество изготовления, контроль параметров магнитов является важным этапом при сборке ондулятора. Для измерения параметров, в зависимости от выбранной формы магнитов, может потребоваться модификация стандартных методов измерения либо разработка новых.

Метод измерения намагниченности, рассмотренный в данной статье, обеспечивает точность, достаточную для изготовления нового ондулятора с переменным периодом для новосибирского ЛСЭ. Использование этого ондулятора позволит существенно расширить границы возможных применений данного ЛСЭ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №21-12-00207).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Винокуров Н. А., Шевченко О. А.* Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН // УФН. 2018. Т. 188, № 5. С. 493.
2. *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.

3. *Davidyuk I., Shevchenko O. A., Tcheskidov V. G., Vinokurov N. A.* Magnetic and Mechanical Design of Large-Aperture Variable-Period Permanent Magnet Undulator // Nucl. Instr. Meth. A. 2019. V. 915. P. 36–39.
4. *Martin D., Benz M.* Magnetization Changes for Cobalt-Rare-Earth Permanent Magnet Alloys When Heated up to 650 °C // IEEE Trans. Magn. 1972. V. 8, No. 1. P. 35–41.
5. *Trout S. R.* Use of Helmholtz Coils for Magnetic Measurements // IEEE Trans. Magn. 1988. V. 24, No. 4. P. 2108–2111.
6. *Gorbachev Ya., Davidyuk I., Serednyakov S., Vinokurov N., Tcheskidov V., Pavlenko A., Batrakov A., Shtro K., Shevchenko O.* Measurements of Magnetic Field of Variable Period Undulator and Correction of Field Errors // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. 020009; <https://doi.org/10.1063/5.0031522>.
7. *Barker J. R.* New Coil Systems for the Production of Uniform Magnetic Fields // J. Sci. Instrum. 1949. V. 26, No. 8. P. 273–275.
8. *Batrakov A., Pavlenko A., Shickov D., Vagin P.* Multimode Digital Integrators for Precise Magnetic Measurements // Proc. of the 23rd Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC 2012), Saint Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012. P. 617–619; <https://accelconf.web.cern.ch/rupac2012/papers/weppd032.pdf>.

Получено 18 ноября 2022 г.