

УДК 621.373.826;621.384.64

РАЗРАБОТКА ОНДУЛЯТОРА С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДОМ ДЛЯ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

© 2019 г. И. В. Давидюк^{1,2,*}, О. А. Шевченко¹, В. Г. Ческидов¹,
Н. А. Винокуров¹, Я. В. Гетманов^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики
имени Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Новосибирский национальный исследовательский государственный университет”, Новосибирск, Россия

*E-mail: daveduke@outlook.com

Описана разработка гибридного ондулятора с малым отношением периода к зазору (0.75) для новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Конструкция ондулятора позволяет перестраивать его период и изменять число полюсов. Поскольку конфигурация на постоянных магнитах может быть масштабирована с сохранением распределения поля, данная конструкция может быть применена как в установках, работающих в терагерцевом диапазоне, так и для рентгеновских лазеров. В статье представлены результаты компьютерного моделирования и расчеты основных параметров ондулятора.

DOI: 10.1134/S036767651902011X

ВВЕДЕНИЕ

Ондулятор – устройство, создающее переменное магнитное поле на пути движения электронного пучка, благодаря чему возможен обмен энергией между пучком и электромагнитной волной [1]. Главным преимуществом ондуляторного излучения является возможность перестройки длины резонансной волны изменением параметров ондулятора. Длина волны излучения зависит от энергии электронов, амплитуды поля в ондуляторе и его периода. Изменение амплитуды поля является самым распространенным способом перестройки длины волны, изменение амплитуды может быть произведено изменением тока в электромагнитах, либо изменением величины зазора между верхней и нижней частями ондулятора.

В [2] указаны некоторые преимущества перестройки периода ондулятора, среди которых больший диапазон перестройки и мощность излучения на коротких длинах волн. Ondулятор с переменным периодом и ведущим магнитным полем для установки на накопителях, основанный на устройстве пантографа, был разработан и описан в [3]. В институте ядерной физики имени Будкера была предложена схема гибридного ондулятора с разделенными полюсами [4], подобный ондулятор был разработан для второй очереди новосибирского ЛСЭ, результаты компьютерного моделирования [5] показывают, что установка он-

дулятора с переменным периодом расширит диапазон генерации второй очереди ЛСЭ. Был изготовлен прототип разработанного ондулятора и проведены его механические и магнитные измерения [6].

Новый ондулятор с переменным периодом был разработан с целью установки на первую очередь новосибирского ЛСЭ. Первая очередь – источник излучения в терагерцевом диапазоне, она состоит из нормально проводящего линейного ускорителя-рекуператора на энергию 10 МэВ и одной обратной дорожки, на которой расположены два электромагнитных ондулятора и трехполюсный вигглер между ними, играющий роль группирователя [7]. С целью расширить область генерации, переместив длинноволновую границу с 200 до 450 мкм, было решено сделать модификацию обратной дорожки первой очереди ЛСЭ: расширить диаметр вакуумной камеры, это позволит снизить дифракционные потери на краях ондулятора, укоротить оптический резонатор, что позволит уменьшить размер оптического пучка на зеркалах, заменить квадрупольные линзы на новые с увеличенной апертурой.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ

Разработанный ондулятор длиной 8.6 м заменит старую ондуляторную секцию длиной 9 м, при этом длинноволновая граница диапазона пе-

Таблица 1. Сравнение основных параметров старой и новой ондуляторных секций

Параметр	Установленные электромагнитные ондуляторы	Ондулятор с переменным периодом
Период, см	12	10–16
Величина зазора (диаметр вписанной окружности)	8	14
Число периодов	2×32	50–80
Длина волны основной гармоники излучения, мкм	90–240	82–450
Параметр ондуляторности K	0–1.1	0.45–1.9
Полная длина, м	2×4	8.6

редвинется с 230 до 450 мкм и дальше (конечная граница области генерации будет определена оптическими потерями в резонаторе). При этом минимальный среднеквадратичный размер оптического пучка на краях ондулятора увеличится в полтора раза [8], поэтому апертура вакуумной камеры должна быть увеличена. Согласно расчетам, при величине внутреннего диаметра вакуумной камеры 13 см смещение длинноволновой границы не повлечет серьезного увеличения дифракционных потерь. Сравнение параметров старой системы ондуляторов с разработанным ондулятором с переменным периодом произведено в табл. 1.

Энергия электронного пучка может варьироваться в диапазоне 10.5–13.3 МэВ, что позволяет дополнительно расширить диапазон перестройки длины волны излучения (это было учтено при расчете ширины диапазона генерации). На такой низкой энергии электронов фокусировка полем ондулятора играет важную роль в динамике пучка. Круглый профиль полюса ондулятора, показанный на рис. 1 позволяет перераспределить градиент поля при удалении от оси ондулятора в направлениях, перпендикулярных пути движения электронов, таким образом обеспечив горизонтальную фокусировку электронного пучка полем ондулятора. Кроме того, понижение вертикального градиента ослабляет зависимость поля от расстояния до полюса, тем самым увеличивая ам-

плитуду поля на оси, что особенно полезно в случае большой апертуры.

При минимальном периоде разработанное устройство представляет из себя обычный гибридный ондулятор, состоящий из неодимовых магнитов с намагниченностью 1.3 Тл, параллельной оси ондулятора, и полюсами из низкоуглеродистой стали. При этом каждый полюс разделен пополам в плоскости, перпендикулярной оси ондулятора, таким образом ондулятор состоит из верхнего и нижнего рядов отдельных блоков (рис. 2). В каждый блок входит магнит, обхваченный двумя половинками полюсов и алюминиевым каркасом. Верхний и нижний блоки соединены, вся конструкция установлена на каретку, которая может двигаться вдоль направляющего рельса с малым трением. Соседние магниты в каждом ряду имеют антипараллельные намагниченности и испытывают взаимное отталкивание. Таким образом, период ондулятора можно изменять, перемещая лишь крайние блоки, другими словами, изменяя полную длину ондулятора. Для перемещения крайних блоков предусмотрены винтовые подвижки, управление которыми можно производить из пультовой.

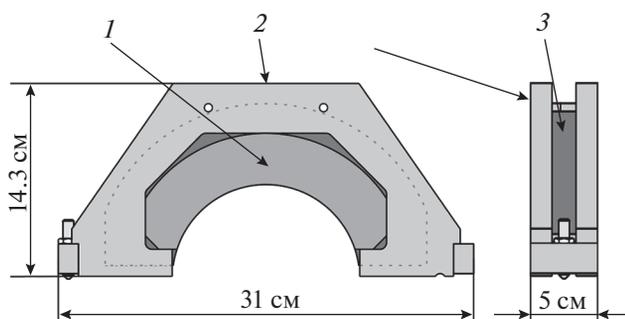


Рис. 1. Магнитный блок: 1 – железный полюс, 2 – алюминиевый каркас, 3 – магнит.

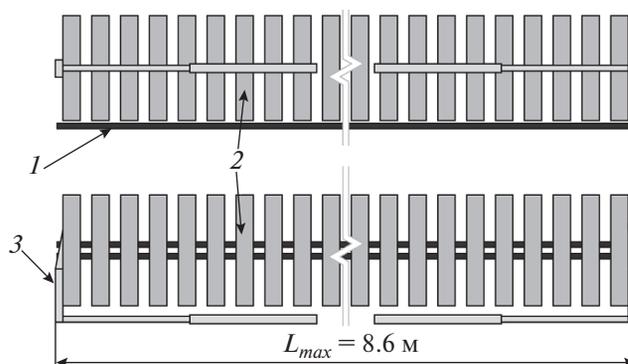


Рис. 2. Схематический вид ондулятора спереди (верхний) и сверху (нижний): 1 – направляющий рельс, 2 – подвижный магнитный блок, 3 – толкатель.

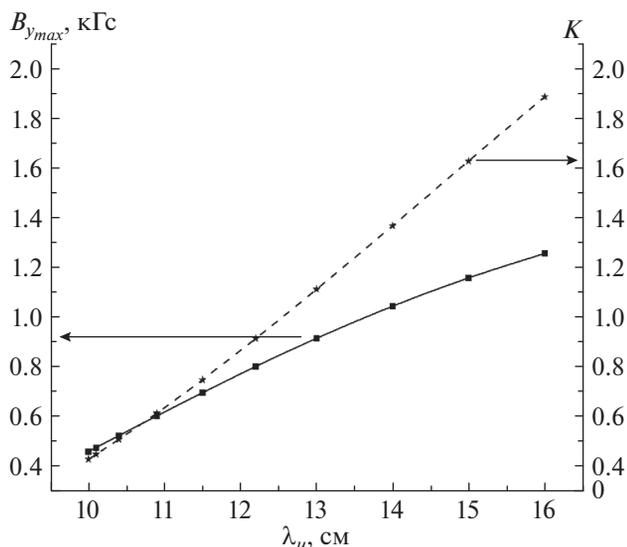


Рис. 3. Зависимости амплитуды поля $B_{y_{max}}$ (непрерывная линия) и коэффициента ондуляторности K (штриховая линия) от периода ондулятора λ_u .

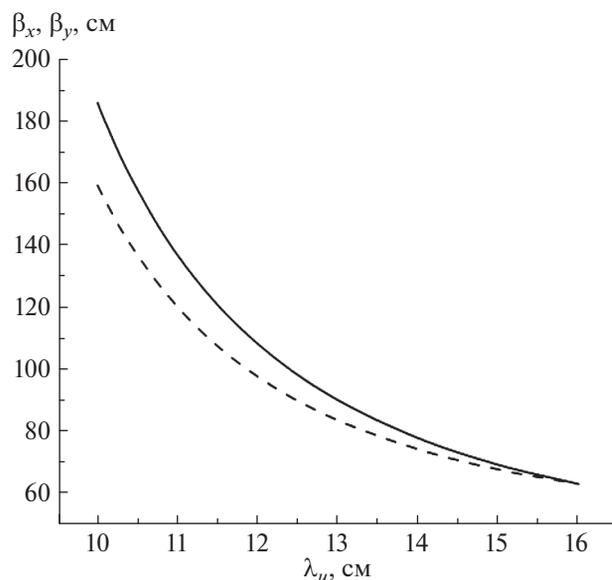


Рис. 5. Согласованные вертикальная β_y (непрерывная) и горизонтальная β_x (штриховая) бета-функции в ондуляторе в зависимости от периода ондулятора λ_u .

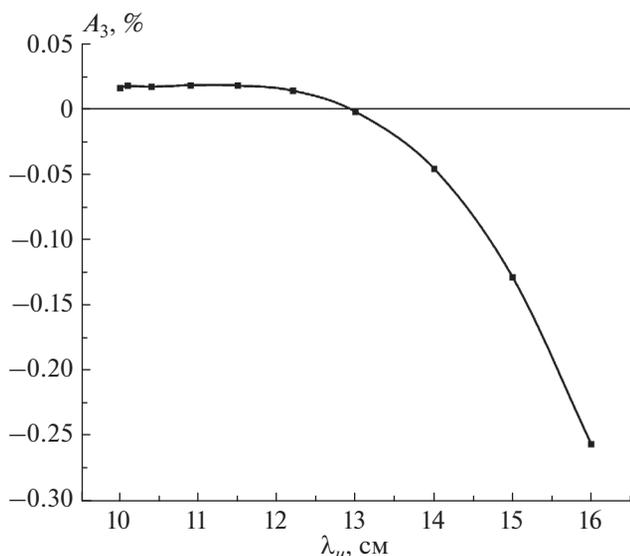


Рис. 4. Зависимость нормированной амплитуды третьей гармоники A_3 поля в ондуляторе от периода λ_u .

Когда механические толкатели не сведены до минимальной длины ондулятора, между блоками образуются зазоры. Освободившееся место можно использовать для установки дополнительных блоков, другими словами, для увеличения числа полюсов в ондуляторе (период ондулятора при этом, разумеется, уменьшится). Для этой цели разработано специальное устройство, позволяющее раздвинуть два блока и вставить между ними дополнительный период.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Компьютерное моделирование распределения поля в ондуляторе производилось в программе CST Studio. Основные размеры магнитов и полюсов были оптимизированы для реализации приведенных выше рассуждений. Минимальный период ондулятора был определен в компромиссе между стремлением получить излучение на коротких длинах волн и необходимостью обеспечить приемлемое значение параметра ондуляторности. Зависимости амплитуды магнитного поля и параметра ондуляторности K , рассчитанного с учетом задержки всеми гармониками поля ондулятора, от периода ондулятора приведены на рис. 3.

При увеличении периода ондулятора увеличиваются разрывы между половинками полюсов, что неизбежно ведет к росту амплитуды третьей гармоники поля. Однако неосновные гармоники поля сильно подавлены благодаря большой апертуре, зависимость амплитуды третьей гармоники от периода изображена на рис. 4.

Благодаря огибающей форме полюса удалось перераспределить градиенты поля и ввести фокусировку в горизонтальном направлении. Рисунок 5 показывает согласованные бета-функции электронного пучка в ондуляторе при разных периодах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Конструкция ондулятора со свободно движущимися блоками допускает неравномерное распределение расстояний между полюсами ондулятора вследствие трения при движении или наклона

оси ондулятора. Этот недостаток часто является основным аргументом против использования ондулятора с переменным периодом. Влияния таких ошибок были рассмотрены в [5], где также были описаны возможные пути предотвращения значительного влияния этих ошибок на отклонение фазы электронного пучка от резонансной и спектр излучения электрона. Также в статье был предложен алгоритм перестройки периода ондулятора, актуальный и для конструкции, описанной в данной статье.

Разработанный ондулятор находится на стадии изготовления. Моделирование показало, что без изменений параметров электронного пучка обратную дорожку первой очереди новосибирского ЛСЭ позволяет существенно расширить диапазон перестройки генерируемого излучения. Это возможно за счет того, что схема с переменным периодом позволяет обеспечить меньший период для коротковолновой части диапазона, большую апертуру для длинноволновой части и меньшую вариацию амплитуды поля при одинаковом смещении резонансной длины волны излучения по сравнению с конструкцией с переменным зазором или основанной на электромагнитах.

Конструкция ондулятора со свободно двигающимися блоками позволяет также увеличивать число периодов для коротковолновой части спектра, тем самым увеличивая коэффициент усиления. Это возможно благодаря тому, что постоянные магниты не нуждаются в источниках питания

и охлаждении; кроме того, они сравнительно недорогие. Структура, основанная на постоянных магнитах, может быть объемно масштабирована с сохранением распределения поля. К примеру, при уменьшении минимального периода ондулятора до 8 мм с апертурой 1 см ондулятор может быть установлен на накопитель с энергией 3 ГэВ, при этом будет возможна генерация фотонов с длинами волн до десятых долей нанометра на основной гармонике; высшие же гармоники будут сильно подавлены в связи с малым значением коэффициента ондуляторности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levichev E., Vinokurov N.* // Rev. Accel. Sci. Technol. 2010. V. 03. № 01. P. 203.
2. *Tatchyn R.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1989. V. 275. № 2. P. 430.
3. *Shenoy G.K. et al.* // J. Synchrotr. Radiat. Intern. Union of Crystallogr. 2003. V. 10. № 3. P. 205.
4. *Vinokurov N.A., Shevchenko O.A., Cheskidov V.G.* // Phys. Rev. Spec. Top. 2011. V. 14. № 4. P. 040701.
5. *Davidyuk I. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2016. V. 19. № 2. P. 020701.
6. *Davidyuk I.V. et al.* // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. 2017. V. 871. P. 77.
7. *Shevchenko O.A. et al.* // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 13.
8. *Kubarev V.V. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2004. V. 528. № 1–2. P. 199.