

УДК 333.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ОНДУЛЯТОРА ИМПУЛЬСНО-ПРОВОЛОЧНЫМ МЕТОДОМ

Л.А. ГАБРИЕЛЯН*, М.К. ОГАНЕСЯН, М.Л. ПЕТРОСЯН

Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван

*e-mail: gabrielyan@yerphi.am

(Поступила в редакцию 17 октября 2013 г.)

Приведены результаты исследования магнитных характеристик плоского магнитного ондулятора для ЛСЭ терагерцового диапазона с помощью импульсно-проволочного метода. Особое внимание уделено методике измерения второго интеграла магнитного поля ондулятора, показывающего изменение положения пучка частиц при прохождении им магнитной системы ондулятора.

1. Введение

Ондуляторы или виглеры являются неотъемлемой частью установок лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). А поскольку интерес к последним растет с каждым годом, то возрастают требования, предъявляемые к полям, создаваемым ондуляторами и виглерами. Определение интегральных характеристик подобных устройств при их конструировании является одной из важнейших задач. Одним из быстрых способов измерения интегральных характеристик является применение так называемого импульсно-проволочного метода. Ниже приводятся результаты исследования плоского гибридного ондулятора для ЛСЭ терагерцового диапазона (описание которого приведено в работах [1,2]), полученные применением данного метода.

Одной из первых работ по использованию импульсного проволочного метода для быстрого измерения характеристик магнитных полей ондуляторов была статья Р. Уоррена (Лос-Аламос, США) [3]. Этот метод применялся и в ряде других работ [4-6].

Действие, производимое магнитным полем на электронный пучок, можно охарактеризовать двумя параметрами – изменением угла

$$x' = -\frac{ec}{E} \int B_y dz \quad (1)$$

и изменением положения электронного пучка на выходе из магнитного элемента

$$x \equiv \int x' dz = -\frac{ec}{E} \iint B_y dz. \quad (2)$$

Эти соотношения легко получаются из выражения для силы Лоренца для заряда в магнитном поле.

Для настройки магнитных элементов ондулятора, помимо распределения магнитного поля, важно знать первый и второй интегралы магнитного поля вдоль оси ондулятора, которые определяют угол x' и координату x выхода пучка из ондулятора.

2. Описание метода

На рис.1 показана принципиальная схема установки для измерения интегральных характеристик магнитного поля ондулятора.

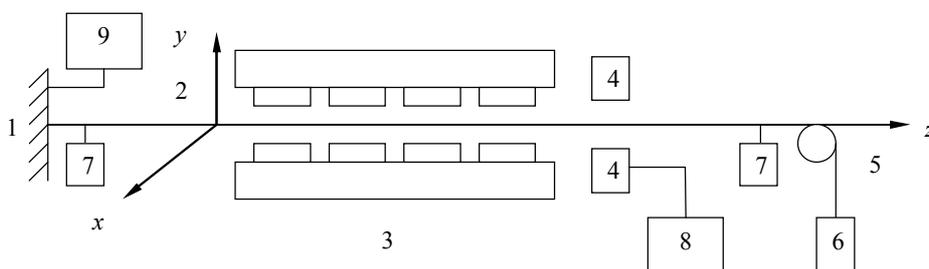


Рис.1. Схема установки для измерения интегральных характеристик магнитного поля ондулятора. 1 – неподвижная опора; 2 – проволока; 3 – ондулятор; 4 – датчик положения нити; 5 – подвижная опора; 6 – груз; 7 – демпферы; 8 – осциллограф; 9 – генератор.

По проволоке пропускается импульс тока I . При прохождении импульса тока на проволоку действуют локальные поперечные силы Лоренца, пропорциональные величине протекающего тока и величине магнитного поля в данной точке, и, как следствие, в проволоке образуется область возмущения, которая начинает распространяться по проволоке в прямом и обратном направлениях [4] с акустической скоростью

$$v = \sqrt{T/P} = 100 \text{ м/с}, \quad (3)$$

где $T = 0.98 \text{ кг}\cdot\text{м/с}^2$ – сила натяжения нити, $P = 8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}$ – линейная плотность материала нити. Датчик отклонения проволоки (рис.1), расположенный вблизи одного из концов ондулятора, фиксирует поперечную волну проволоки.

Сигнал на выходе датчика отклонения проволоки будет пропорционален первому интегралу магнитного поля (при использовании короткого импульса тока) или второму интегралу магнитного поля (при использовании длинного импульса тока) [3]. Под коротким следует понимать такой импульс, за время которого смещение акустической волны будет значительно меньше длины периода ондулятора:

$$\Delta t \ll \frac{\lambda_w}{v}, \quad (4)$$

где λ_w – длина периода ондулятора.

При скорости акустической волны 110 м/с и длине периода ондулятора 9 см верхний предел для длительности импульса тока оказывается равным $8 \cdot 10^{-4}$ с.

Для наблюдения второго интеграла магнитного поля требуется более длинный импульс тока. За время этого импульса акустическая волна должна успеть пройти весь ондулятор, т.е. должно быть выполнено условие

$$\Delta t \geq \frac{L_w}{v}, \quad (5)$$

где L_w – длина ондулятора.

Работа производилась на ондуляторе длиной 180 см (при скорости акустической волны 110 м/с), а расчетная длительность импульса тока составляла 6 мс. Нами была выбрана длительность импульса 10 мс.

Согласно [3], отклонение провода может быть выражено суммой двух волн, бегущих в противоположных направлениях:

$$y(z, t) = f(z - vt) + g(z + vt), \quad (6)$$

где f и g – произвольные функции, $v = \sqrt{T/P}$ – скорость акустической волны, T и P – соответственно, натяжение и линейная плотность проволоки. В работе [3] показано, что амплитуда отклонения провода в случае короткого импульса тока равна

$$y(t) = \frac{I\Delta t}{2vP} \int B(z) dz, \quad (7)$$

а угловое отклонение электронного пучка пропорционально этому интегралу.

Для длинного импульса амплитуда отклонения провода определяется как

$$y(t) = \frac{I}{2v^2 P} \iint B(z) dz dz', \quad (8)$$

и смещение электронного пучка пропорционально этому интегралу. А поскольку зависимость магнитного поля от z является тригонометрической функцией, то можно определить амплитуды отклонений для обоих случаев в виде

$$A_1 = \frac{I\Delta t B_0}{2vPk_w} = \frac{I\Delta t B_0 \lambda_w}{4\pi P v}, \quad (9)$$

$$A_2 = \frac{IB_0 \lambda_w^2}{8\pi^2 P v^2}. \quad (10)$$

3. Описание измерительной системы и результаты измерений

Схема датчика измерения амплитуд колебания проволоки приведена на рис. 2.

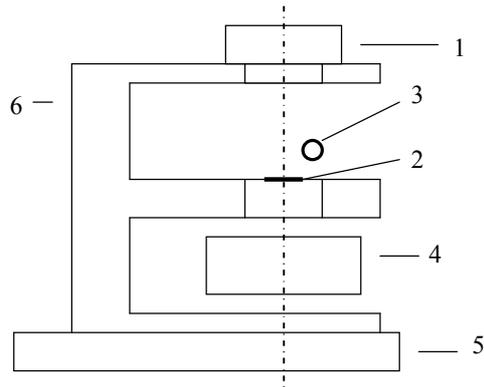


Рис.2. Конструкция датчика положения проволоки:
 1 – светодиод, 2 – маска, 3 – проволока, 4 – фотодиод,
 5 – микрометрический стол, 6 – станина.

Маска имеет окно прямоугольной формы. В датчике используется фотодиод ФД-24К. Характеристика датчика показана на рис.3. Как видно из рис.3, имеется два линейных участка, на которых можно производить измерения. Выбор остановился на левом линейном участке, несмотря на то, что его крутизна несколько меньше правого участка, поскольку работа на данном участке позволяет производить измерения для большего диапазона отклонений нити. Чувствительность приемника на данном участке составляет порядка 10 мВ/мкм.

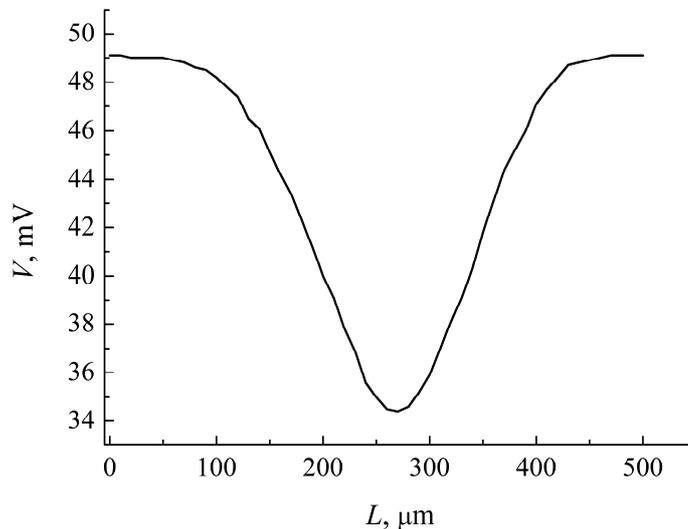


Рис.3. Зависимость выходного сигнала датчика от положения проволоки.

Максимальная амплитуда поперечных отклонений электронов в ондуляторе определяется из уравнения движения по формуле

$$X_{\max} = \frac{eB_0}{E_e k_w^2} = \frac{K}{k_w \gamma} \quad (11)$$

Максимальный угол между вектором скорости электрона и направлением его движения также является периодической функцией с амплитудой:

$$\phi_{\max} = \frac{eB_0}{E_e k_w} = \frac{K}{\gamma}, \quad (12)$$

где e – заряд электрона, B_0 – амплитуда магнитного поля, E_e – энергия частицы, k_w – волновое число ондулятора, K – фактор ондуляторности, γ – лоренц-фактор.

В данном случае максимальная амплитуда колебаний в ондуляторе составляет 70 мкм, а поскольку диапазон измерения отклонения нити для датчика составляет около 250 мкм (рис.3), то становится возможным его применение для регистрации расчетных отклонений провода.

Минимальная длина проволоки определяется из протяженности измеряемого ондулятора: волновой пакет, несущий информацию о магнитном поле ондулятора, должен быть измерен раньше, чем на него наложатся волны, отраженные от опор установки. То есть со стороны, где расположен детектор, расстояние от детектора до опоры должно быть больше длины ондулятора, а с противоположной стороны – расстояние от опоры до начала ондулятора должно быть больше половины длины ондулятора. Таким образом, длина установки должна быть не менее, чем в 2.5 раза, больше длины измеряемого ондулятора ($L \geq 2.5L_w$) [6].

На рис.4. приведены осциллограммы сигнала на выходе датчика положения проволоки. Как видно из рисунка, колебание проволоки отображено как в левой, так и в правой осциллограммах. В разных работах используется то левая [7], то правая [5] осциллограммы. Для изучения этого вопроса, измерения проводились в ондуляторе без корректировки магнитного поля.

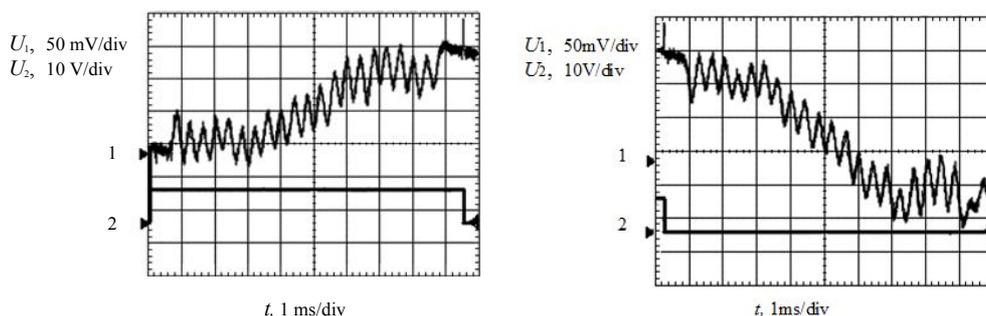


Рис.4. Осциллограммы сигнала на выходе датчика положения проволоки. Левая осциллограмма – сигнал во время импульса, правая – после импульса.

В левой осциллограмме в точке 1 на датчик поступает сигнал от начала ондулятора, в начале импульса тока в проводе. Поэтому отклонение локальное, акустическая волна только начинает распространяться в ондуляторе. Отклонение проволоки в начале ондулятора равно величине точки 2 и это не отклонение проволоки в конце ондулятора. Таким образом, из левой осциллограммы можно

получить величину отклонения проволоки только в начале ондулятора. В правой осциллограмме проволока приняла свое окончательное положение и при снятии тока акустическая волна, поступающая на датчик, несет информацию со всех участков ондулятора. Как видно из осциллограммы, проволока в начале и в конце ондулятора смещена в разные стороны. При этом смещение в начале ондулятора больше, чем в конце. При прохождении электронного пучка картина будет другая, в начале ондулятора смещение (огibaющей) будет равно нулю. Поэтому при использовании осциллограммы необходимо ввести некоторую корректировку в выражение (8):

$$y(t) = \frac{I}{2v^2 P} \iint B(z) dz dz_1 + C, \quad (13)$$

где C – постоянная интегрирования, которую можно определить из условия, что при $t = 0$ смещение $y(t) = 0$. Тогда имеем

$$y(t) = \frac{I}{2v^2 P} \iint B(z) dz dz_1 - \frac{IB_0}{2v^2 P}. \quad (14)$$

С помощью данной измерительной установки с использованием импульсно-проволочного метода была осуществлена корректировка магнитных элементов ондулятора. Осциллограмма второго интеграла после корректировки приведена на рис.5.

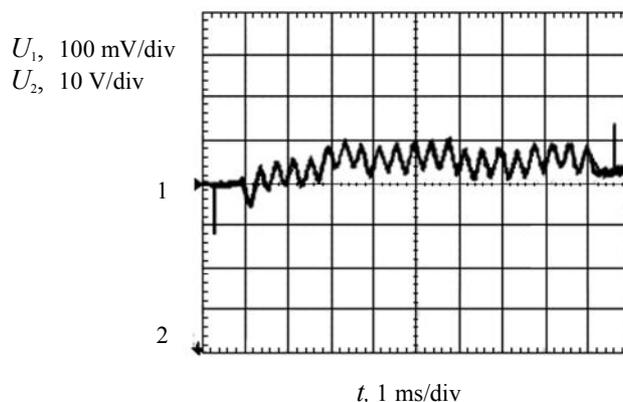


Рис.5. Осциллограмма второго интеграла после корректировки ондулятора.

Необходимо отметить, что при таком методе измерения нет информации об угловых расхождениях электронного пучка при выходе из ондулятора, что не очень важно, так как после ондулятора пучок не используется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Р. Назарян, Г.Х. Товмасын, К.Б. Оганесян. Изв. НАН Армении, **42**, 57 (2007).
2. M.L. Petrosyan, L.A. Gabrielyan, Yu.R. Nazaryan, G.Kh. Tovmasyan, K.B. Oganesyanyan. Laser Physics, **17**, 1077 (2007).
3. R.W. Warren. Nucl. Instr. and Meth., **A272**, 257 (1988).
4. R.W. Warren, C.J. Elliot. Undulator Magnets for Synchrotron Radiation and Free Elec-

- tron Lasers. Proc. of the Adriatico Research Conference, Trieste, Italy, June 1987, eds. R. Bonifacio, L. Fonda and C. Pellegrini. World Scientific, Singapore, 1988.
5. **A.A. Varfolomeev, A.S. Khlebnikov, N.S. Osmanov, S.V. Tolmachev.** Nucl. Instr. and Meth., **A341**, 470 (1994).
 6. **С.В.Толмачев.** Экспериментальные исследования по созданию специальных ондуляторов для лазеров на свободных электронах и лазерных ускорителей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.м. наук, Москва, 2004.
 7. **Z. Wolf.** A Magnetic Measurement Plan For The Delta Undulator. LCLS-TN-13-4, SLAC. 2012.

ՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ՕՆԴՈՒԼՅԱՏՈՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԼԱՐԱՅԻՆ ՄԵԹՈԴԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Լ.Ա. ԳԱԲՐԻԵԼՅԱՆ, Մ.Կ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Մ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Բերված են տերահերցային տիրույթում ԱԷԼ հարթ մագնիսական օնդուլյատորի բնութագրերի ուսումնասիրման արդյունքները իմպուլսային լարային մեթոդի կիրառման միջոցով: Հաստիկ ուղադրություն է դարձված մագնիսական դաշտի երկրորդ ինտեգրալի չափման մեթոդիկային, որը ցույց է տալիս մասնիկների փնջի դիրքի փոփոխությունը օնդուլյատորի մագնիսական համակարգը անցնելուց:

EXPERIMENTAL STUDY OF MAGNET UNDULATOR
WITH PULSED-WIRE METHOD

L.A. GABRIELIAN, M.K. HOVHANNISYAN, M.L. PETROSYAN

Experimental study of magnetic characteristics of planar magnet undulator for terahertz FEL by using a pulsed-wire method has been carried out. Special attention was given to undulator magnetic field second integral measurement procedure, which shows the change of a beam position as it passed the undulator magnetic system.