

УДК 533.9

ОНДУЛЯТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ИЗ ФЕРРИМАГНЕТИКОВ

М.Л. ПЕТРОСЯН, Л.А. ГАБРИЕЛЯН,
Ю.Р. НАЗАРЯН, Г.Х. ТОВМАСЯН, К.Б. ОГАНЕСЯН

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 20 марта 2006 г.)

Создан ондулятор для терагерцового ЛСЭ из ферритовых материалов. Длина периода ондулятора составляет 9 см, число периодов – 27. С помощью подбора и перераспределения магнитных элементов удалось снизить разброс по амплитудам магнитного поля до 7%. Использованы дополнительные обмотки на магнитных элементах для компенсации остаточного разброса. Необходимый фокусирующий градиент магнитного поля получается за счет относительного смещения вдоль оси x чередующихся полюсов с противоположным знаком магнитного поля. Исследованы параметры ондулятора, в том числе и фокусирующие свойства в горизонтальной плоскости.

1. Введение

По способу создания магнитного поля ондуляторы можно разделить на электромагнитные (в том числе сверхпроводящие) и на постоянных магнитах. Каждый из этих видов имеет свои преимущества и недостатки. В [1] приводятся результаты численных расчетов для различных ондуляторных схем, выполненных с помощью трехмерного магнитостатического кода RADIA. Для каждого типа ондуляторов было найдено максимально достижимое магнитное поле как функция отношения зазора к периоду ондулятора.

В последние годы наибольший интерес и широкое распространение как с точки зрения максимального достигаемого магнитного поля, так и простоты и компактности конструкции, представляют ондуляторы на постоянных редкоземельных магнитах. Однако эти магниты очень дороги, труднообрабатываемы и имеют значительный разброс параметров. В данной работе приводится описание ондулятора, в котором применены более дешевые ферритовые магниты. Ондуляторный магнит предусмотрен для использования в проекте А820 МНТЦ, выполняемом в ЕрФИ [2].

2. Конструкция ондулятора

В магнитных ондуляторах стараются получить наиболее высокое значение коэффициента ондуляторности

$$k = \frac{eB_0\lambda_U}{2\pi mc^2} = 0.943 \cdot \lambda_U [\text{см}] \cdot B_0 [\text{Т}], \quad (1)$$

где λ_U – длина периода ондулятора, B_0 – амплитуда магнитного поля ондулятора. Так как в классическом ондуляторном излучении $k \sim 1$, то выбор величины магнитного поля зависит от величины λ_U . При коротких длинах периода ондулятора требуются высокие значения магнитного поля и используются либо электромагниты, либо постоянные магниты из редкоземельных элементов.

При создании ондуляторов для ЛСЭ в терагерцовой области длина периода ондулятора составляет порядка 10 см, и, следовательно, потребуется магнитное поле порядка 1000 Э. Поэтому стало возможным использование самых дешевых и широко распространенных магнитов из ферритовых материалов. Использовались постоянные магниты марки 22БА220. Длина периода ондулятора составляет 9 см, число периодов – 27. Ширина магнитов составляет 6 см, высота – 2 см.

Предварительные расчеты показали, что для получения необходимой амплитуды магнитного поля ондулятора не менее 0,1 Т достаточно, чтобы длина магнитов составляла 2,7 см. Однако при таких размерах магнитных пластин вид кривой распределения магнитного поля был далек от синусоидального. После более точных расчетов, произведенных с помощью программы FEMLAB-3.1, было получено, что для синусоидального распределения магнитного поля длину магнитов следует выбрать равной 3,2 см. Распределение магнитного поля по длине одного периода приведено на рис.1.

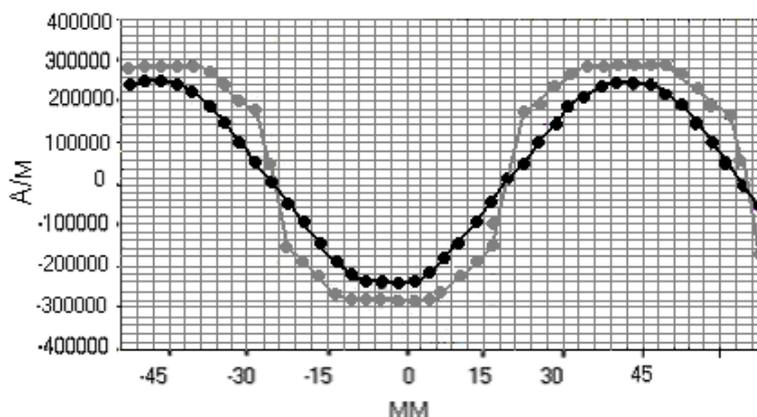


Рис.1. Распределение магнитного поля по длине одного периода (чёрная линия – по центру ондулятора, серая – вблизи полюсов).

3. Сортировка магнитов

Центральной задачей при создании ондулятора было достижение одинаковой амплитуды магнитного поля во всех периодах ондулятора.

Одним из основных недостатков конструкции ондулятора на постоянных магнитах является большой разброс магнитной индукции в разных магнитных элементах. Результаты исследования разброса величины магнитной индукции для всех элементов показали, что первоначальный разброс параметров составляет 40%, и дальнейшее применение таких элементов является невозможным без применения специальных мер.

Для уменьшения разброса был произведен подбор магнитных элементов с разбросом величины магнитной индукции в диапазоне 18%, при этом отбраковалось 20% магнитных элементов.

Для приравнивания амплитуд магнитного поля всех периодов применялось два метода. Во-первых, с помощью подбора и перераспределения магнитных элементов удалось снизить разброс по амплитудам магнитного поля до 7%. Во-вторых, использовались дополнительные обмотки на магнитных элементах для компенсации остаточного разброса. Проведенные измерения показали, что с помощью относительно малых обмоток с плотностью тока 3 А/мм² возможно достигнуть хорошей компенсации ((3%).

4. Фокусировка пучка в ондуляторе

Широко используемые плоские ондуляторы создают естественную фокусировку электронного пучка только в одном вертикальном направлении y . При генерации электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне длин волн используются заметно расходящиеся электронные пучки низкой энергии. В связи с этим требуется эффективная фокусировка в обоих поперечных направлениях x и y .

Согласно работе [3], волновые числа колебаний пучка по всем трем направлениям x , y и z удовлетворяют условию

$$k_x^2 + k_y^2 = k_U^2, \quad (2)$$

где

$$k_x = \sqrt{\frac{eq}{\gamma mc^2}}, \quad k_U = \frac{2\pi}{\lambda_U} \quad (3)$$

есть бетатронное волновое число квадрупольной фокусировки в горизонтальной плоскости (q – сила квадрупольной фокусировки).

Из формулы (2) следует, что, добавляя фокусировку в горизонтальной плоскости, мы тем самым уменьшаем на такую же величину вертикальную (естественную) фокусировку. Обычно стараются получить равную фокусировку, когда выполняется условие $k_x = k_y = k_U / 2$. Таким образом, градиент поля по горизонтали будет

$$q = k_x^2 \gamma mc^2 / e = 1.12 \cdot 15 \cdot 9.1 \cdot 10^{-28} \cdot 9 \cdot 10^{20} / 4.8 \cdot 10^{-10} = 272 \text{ Гс/см}. \quad (4)$$

Различные авторы предлагали несколько схем ондуляторов, магнитные поля которых могли бы фокусировать электронный пучок. Фокусирующий градиент магнитного поля $V_y(x)$ получается за счет относительного смещения вдоль оси x чередующихся полюсов с противоположным знаком магнитного поля. На краях магнитного зазора возникает преобладание амплитуд магнитного поля одного знака и, следовательно, появляется необхо-

димый профиль $B_y(x)$. На рис.2 приведены результаты измерения и расчета распределения магнитного поля ондулятора в горизонтальном направлении. Из результатов видно, что линейная область с градиентом (300 Гс/см составляет порядка 1 см с центром, смещенным от центра магнитного элемента на 2 см. При этом поле в центре выбранной области уменьшается на 20%. При выборе этого варианта магнитные элементы ставятся смещенными на 2 см от центра ондулятора.

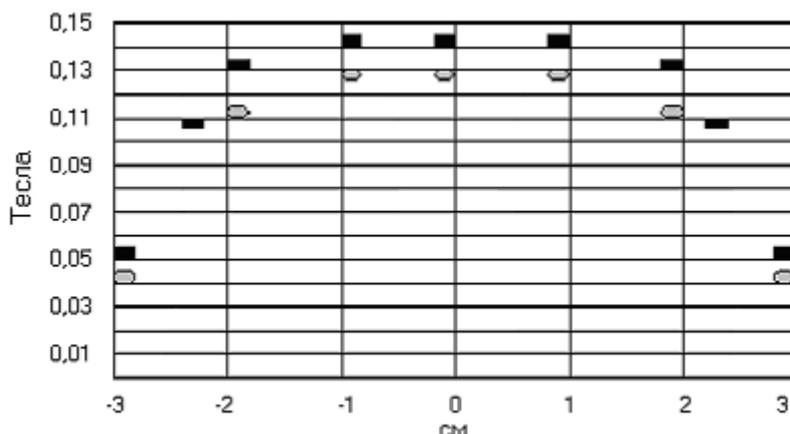


Рис.2. Горизонтальное распределение магнитного поля ондулятора. Круглые значки – результаты измерения, прямоугольные – рассчитанные с помощью FEMLAB.

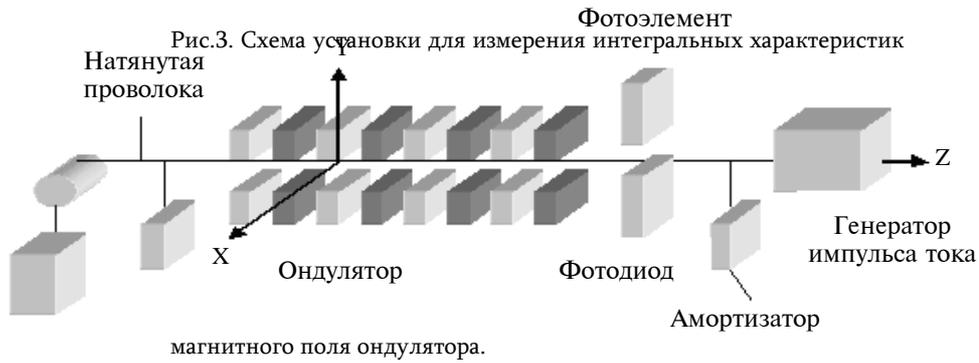
5. Измерение параметров ондулятора

Для настройки магнитных элементов ондулятора, помимо распределения магнитного поля, важно знать первый и второй интегралы магнитного поля вдоль оси ондулятора, которые определяют угол и координату x выхода пучка из ондулятора [4].

Использование импульсного проволочного метода для быстрого измерения магнитных полей ондуляторов было предложено в [4]. Этот метод применялся и в некоторых других работах [5-7]. Была создана аналогичная установка для измерения магнитных характеристик ондулятора. Схема этой установки представлена на рис.3. Основным элементом установки является тонкая проволока, натянутая вдоль оси ондулятора. С одной стороны проволока закрепляется на неподвижной опоре, а с другой – перебрасывается через ролик и натягивается с помощью груза. По проволоке периодически пропускается импульс тока I . В проволоке образуется область возмущения, которая начинает распространяться по проволоке в прямом и обратном направлениях с акустической скоростью

$$v = \sqrt{T/P} \sim 300 \text{ м/с} , \quad (5)$$

где T – сила натяжения нити, P – линейная плотность материала нити.



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).

Амплитуда колебаний проволоки для случая короткого импульса тока имеет вид [6]:

$$A_1 = \frac{I_{01} \Delta t B_0 \lambda_U}{4\pi P v} , \quad (6)$$

где I_{01} – величина тока в проволоке, Δt – длительность импульса.

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

$$\Delta t v > L_{онд} , \quad \text{т.е.} \quad \Delta t > (L_{онд} / v) . \quad (7)$$

При работе с ондуляторами длиной 270 см (при скорости акустической волны 300 м/с) длительность импульса тока составляет 10 мс. Амплитуда колебаний проволоки для случая длинного импульса тока равна

$$A_2 = \frac{I_{02} B_0 \lambda_U^2}{8\pi^2 T} . \quad (8)$$

В частности, амплитуда колебаний равна нескольким миллиметрам при амплитуде импульса тока 1.5 А.

Исследовалось поперечное отклонение проволоки с током для выяснения фокусирующего свойства ондулятора в горизонтальной плоскости. Результаты приведены на рис.4.

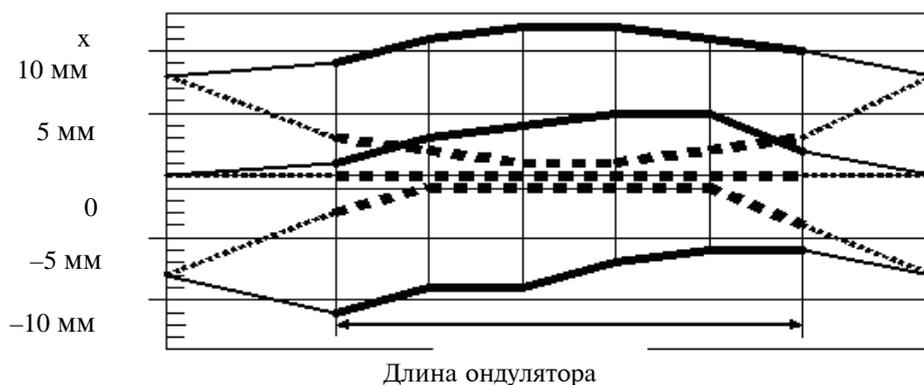


Рис.4. Поперечное отклонение проволоки с током в ондуляторе. Сплошные кривые – при обычном расположении магнитных элементов в ряд. Пунктирные кривые – при смещении магнитов на 1 см от центральной линии.

Как показано на рис.4, имеет место достаточно хорошая фокусировка в горизонтальной плоскости.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.А.Гарибяну, М.К.Оганесяну и М.А.Акопову за помощь в изготовлении ондулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **P.Elleume, O.Chubar, J.Chavanne.** «Computing 3D Magnetic Field from Insertion Devices». Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference 188 (PAC97), May 1997, pp.3509-3511.
2. Free Electron Laser Without Inversion. Проект МНТЦ А820.
3. **E.T.Scharlemann.** J. Appl. Phys., **58**, 2154 (1985).
4. **R.W.Warren.** “Limitations on the use of the pulsed-wire field measuring technique”, NIM, **A272**, 257 (1988).
5. **R.Prown, K.Halbach, J.Harris, H.Winick.** NIM, **208**, 65 (1983).
6. **С.В.Толмачев.** “Экспериментальные исследования по созданию специальных ондуляторов для лазеров на свободных электронах и лазерных ускорителей”. Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Москва, 2004.
7. **B.J.A.Shepherd, J.A.Clarke.** “Magnetic Design of a Focusing Undulator for ALPHA-X”. Proceedings of EPAC-2004, Lucerne, Switzerland.

UNDULATOR WITH FERRIMAGNETIC PERMANENT MAGNETS

M.L. PETROSYAN, L.A. GABRIELYAN, Y.R. NAZARYAN,
G.Kh. TOVMASYAN, K.B. HOVHANNISYAN

The terahertz FEL ferrimagnetic permanent magnet undulator is created. The length of the undulator period is 9 cm, number of the periods is 27. By means of selection and redistribution of magnetic elements it is possible to lower the spread of amplitudes of the magnetic field up to 7 %. Additional windings on magnetic elements were used for indemnification of residual disorder. The needed focusing gradient of a magnetic field is obtained due to relative displacement of alternating poles with an opposite sign of a magnetic field along the x -axis. The undulator parameters, including focusing properties in the horizontal plane, are investigated.