

УДК 333.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОНДУЛЯТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Л.А. ГАБРИЕЛЯН

Ереванский физический институт им. А.И. Алиханяна

(Поступила в редакцию 23 марта 2012 г.)

Проведены исследования гибридного ондулятора для ЛСЭ в терагерцовой области на магнитах из ферритового материала. Проведены симуляция ондулятора в среде FEMLAB и измерения на созданном макете. Приведены результаты измерения зависимости амплитуды магнитного поля от высоты магнитных элементов, а также зависимости магнитной индукции от соотношения ширины магнитных элементов и расстояния между ними. Показано, что гибридная схема ондулятора позволяет выбрать наиболее оптимальные параметры ондулятора. Результаты исследований могут быть использованы при выборе оптимальных параметров ондулятора ЛСЭ терагерцовой области.

### 1. Введение

Основой любой установки лазера на свободных электронах (ЛСЭ) и обращенного лазера на свободных электронах (ОЛСЭ) являются магнитные ондуляторы. Обзоры по физике ЛСЭ и экспериментальным исследованиям изложены в работах [1-4]. В последние годы наибольший интерес и широкое распространение, с точки зрения максимального достигаемого магнитного поля, представляют ондуляторы на постоянных редкоземельных магнитах [5,6]. При этом в большинстве случаев используют конфигурацию ондулятора, предложенную Хальбахом.

Длина волны, соответствующая максимуму линии спонтанного ондуляторного излучения плоского ондулятора, имеет следующий вид [5]:

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

где  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $\Theta$  – угол между направлением излучения и осью электронного пучка,  $K$  – коэффициент ондуляторности, определяемый по формуле [5]

$$K = \frac{eB_0\lambda_w}{2\pi mc^2} = 0.943\lambda_w [\text{см}] B_0 [\text{Тесла}]. \quad (2)$$

Поэтому при создании ондуляторов для ЛСЭ терагерцовой области длина периода ондулятора составляет порядка 10 см, и, следовательно, и магнитное поле

потребуется порядка 0.1 Т. По этой причине стало возможным использование сравнительно дешевых и широко распространенных магнитов из ферритовых материалов.

## 2. Экспериментальное исследование

В ЕрФИ был создан гибридный ондулятор для ЛСЭ терагерцовой области на магнитах из ферритового материала [7], в котором в отличие от безжелезной конструкции, помимо магнитов, используется и магнитопровод из железа. Использовались постоянные магниты марки 22БА220. Длина периода ондулятора составляет 9 см, число периодов – 27. Ширина магнитов составляет 6 см, высота – 2 см. Конструкция ондулятора приведена на рис.1.

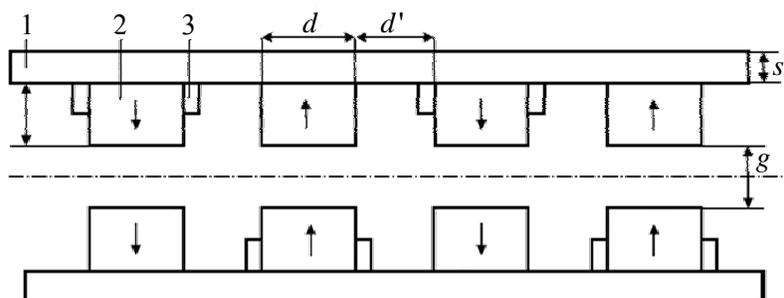


Рис.1. Схема ондуляторного магнита: 1 – железные пластины, 2 – магнитные элементы, 3 – корректирующие обмотки.

После предварительного запуска ЛСЭ терагерцовой области было решено продолжить исследование магнитных характеристик ондулятора, так как при заданных параметрах длины периода и величины зазора ондулятора для остальных конструктивных параметров ондулятора существует множество вариантов. Целью этих исследований было определение оптимальных значений всех параметров ондулятора.

Исследования показали, что гибридная схема ондулятора позволяет выбрать наиболее оптимальные параметры ондулятора. В данной работе приведены результаты этих исследований, которые могут быть использованы при проектировании ондуляторов ЛСЭ терагерцовой области. Была исследована зависимость амплитуды магнитного поля от высоты магнитных элементов. Поскольку не существует аналитической формулы расчета амплитуды магнитного поля гибридного ондулятора такой конфигурации, исследование ондулятора началось с его симуляции в среде FEMLAB.

Для удостоверения правомерности использования FEMLAB был создан макет гибридного ондулятора, состоящий из четырех периодов, для сравнения данных, полученных с помощью FEMLAB, с результатами измерений. На рис.2 приведены результаты расчетов и измерений для следующих параметров ондулятора:  $B_r = 0.3$  Т,  $\lambda_w = 9$  см,  $g = 2$  см,  $h = 2$  см.

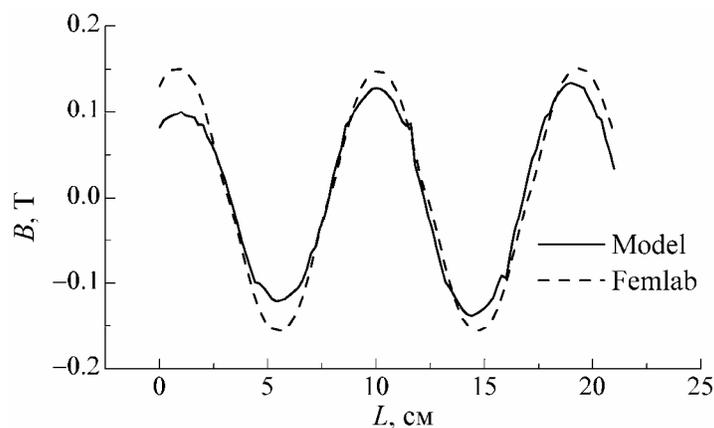


Рис.2. Амплитуда поля вдоль оси ондулятора.

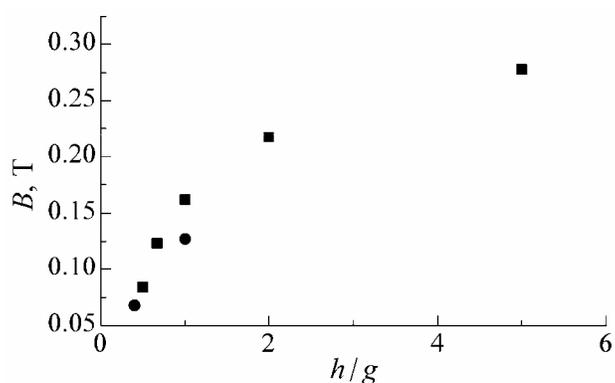


Рис.3. Зависимость магнитной индукции в зазоре ондулятора, рассчитанная с помощью FEMLAB (квадраты), и результаты измерения (кружки).

Из результатов, приведенных на рис.3, следует, что: а) значения, полученные с помощью расчета и измерения близки, по величине, б) при значениях  $h/g < 1$  магнитная индукция резко уменьшается, в) при значениях  $h/g > 2$  магнитная индукция возрастает незначительно. Поэтому, для достижения максимального значения индукции в магнитном зазоре, целесообразно выбрать значения отношения  $h/g > 2-3$ , поскольку дальнейшее увеличение этого отношения требует использования постоянных магнитов большего размера и не дает значительного увеличения индукции.

Была также исследована зависимость магнитной индукции от соотношения ширины магнитных элементов и расстояния между ними ( $d/d'$ ). Результаты исследований приведены на рис.4. Из приведенных результатов видно, что: а) индукция магнитного поля достигает максимальных значений, когда отношение ширины магнитных элементов и расстояния между ними находятся в интервале от 0.5 до 1, б) уменьшение расстояния между магнитами приводит к

медленному уменьшению значения магнитного поля. Так, увеличение соотношения  $d/d'$  от 1 до 4 приводит к уменьшению магнитного поля всего на 18%. Это обстоятельство имеет важное значение, когда при заданном зазоре ондулятора необходимо получить наиболее короткую длину периода ондулятора.

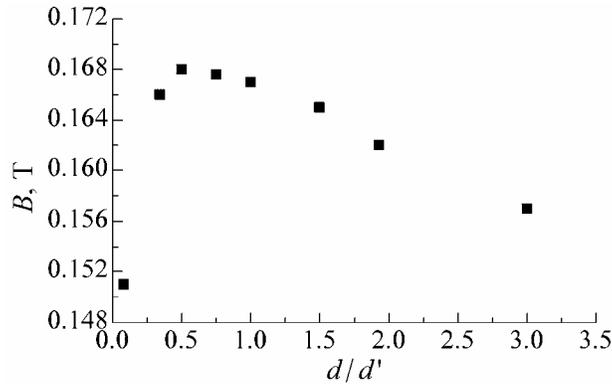


Рис.4. Зависимость магнитной индукции от соотношения  $d/d'$ .

При конструировании ондулятора возникает проблема сортировки магнитных блоков по причине различия их магнитных параметров. В работе [7] для корректировки величин магнитной индукции были использованы дополнительные корректирующие обмотки на отдельных магнитных блоках (рис.1).

Был рассмотрен вариант использования в качестве магнитных полюсов пары магнитных элементов, поставленных друг на друга при сохранении того же магнитного зазора. Данный подход позволяет путем сортировки пар магнитных элементов получить максимально малый разброс поля вдоль оси ондулятора. Однако, по расчетам FEMLAB (рис.5) данный подход не дал значимого увеличения амплитуды магнитного поля. Амплитуда магнитного поля составила 0.165 Т (на 4.85% больше).

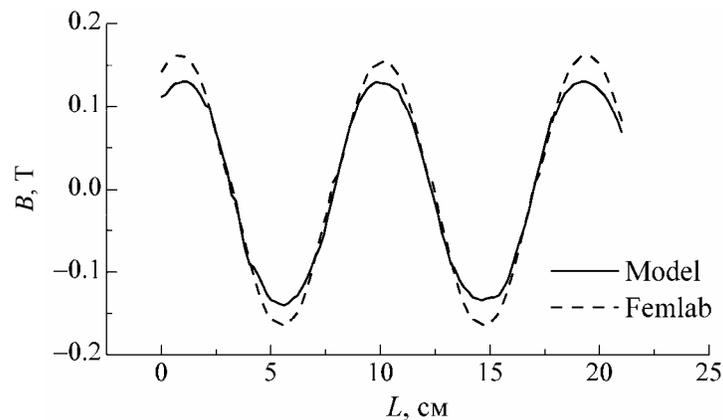


Рис.5. Амплитуды магнитного поля для пары магнитов на полюс.

### 3. Заключение

Вышеприведенные рекомендации, полученные в результате проведенных исследований, помогут в выборе оптимальных параметров ондулятора. В частности, это относится к выбору оптимального соотношения размеров магнитных элементов с магнитным зазором и расстоянием между ними.

Автор выражает особую благодарность за содействие и полезные обсуждения д.ф.м.н. проф. Э.Д. Газазяну и д.ф.м.н. М.Л. Петросяну.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **L.R.Elias, W.M.Fairbank, et al.** Phys. Rev. Lett., **36**, 717 (1976).
2. **А.А.Варфоломеев.** Лазеры на свободных электронах и перспективы их развития: Обзор. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1980.
3. **А.А.Варфоломеев.** Экспериментальные исследования ЛСЭ: Обзор. М.: ЦНИИ атоминформ, 1987.
4. **Т.Маршалл.** Лазеры на свободных электронах. М., Мир, 1987.
5. **G.Brown, K.Halbach, J.Harris, H.Winick.** Nucl. Instr. and Meth., **208**, 65 (1983).
6. **K.Halbach.** Journal de Physique (Paris), **44**, C1-211 (1983).
7. **M.L.Petrosyan, L.A.Gabrielyan, Yu.R.Nazaryan, G.Kh.Tovmasyan, K.B.Oganesyan.** Laser Physics, **17**, 1077 (2007).

### ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՄԱԳՆԻՄՆԵՐՈՎ ՕՆԴՈՒԼՅԱՏՈՐՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Լ.Ա. ԳԱԲՐԻԵԼՅԱՆ

Բերված են տերահերցային տիրույթի ազատ էլեկտրոնային լազերի համար ֆերրիտային մագնիսների հիմքի վրա հիբրիդային օնդուլյատորի ուսումնասիրության արդյունքները: Օնդուլյատորի ուսումնասիրությունը սկսվեց նրա նախագծումից FEMLAB միջավայրում և ստեղծված նմուշի վրա չափումների կատարումից: Ներկայացված են մագնիսական դաշտի կախվածությունը մագնիսական տարրերի բարձրությունից, ինչպես նաև մագնիսական ինդուկցիայի կախվածությունը տարրերի լայնքի և նրանց միջև եղած հեռավորության հարաբերությունից: Ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ հիբրիդային օնդուլյատորի սխեման հնարավորություն է տալիս օնդուլյատորի համար ընտրել առավելագույն օպտիմալ պարամետրերը: Բերված արդյունքները կարող են օգտագործվել տերահերցային տիրույթի ազատ էլեկտրոնային լազերի օնդուլյատորի նախագծման համար:

### INVESTIGATION OF PARAMETERS OF UNDULATORS WITH PERMANENT MAGNETS

L.A. GABRIELIAN

Investigations of a hybrid type undulator for the terahertz FEL with ferrite magnets were carried out. The study began with an undulator simulation in FEMLAB environment and measurements on a created model. The work presents the results of a study of the magnetic field dependence on the height of the magnetic elements and a study of the magnetic induction depending on the ratio of the width of magnetic elements and the distance between them. It is shown that the hybrid undulator scheme allows to select the optimal parameters of the undulator. The obtained results can be used in the design of the terahertz FEL undulators and can help in choosing the optimal parameters of undulators.