

## РАЗРАБОТКА МАГНИТНОГО ГРУППИРОВАТЕЛЯ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С ПОВОРОТОМ НА 540°

*Ш. Б. Лачынов<sup>a, б, 1</sup>, Н. А. Винокуров<sup>a, б</sup>, Я. В. Гетманов<sup>a, б</sup>*

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

<sup>б</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Новосибирск, Россия

Для получения коротких электронных сгустков с большим зарядом используются специальные магнитные системы с сильной зависимостью времени пролета от энергии частиц — так называемые магнитные группирователи. Рассмотрен один из вариантов такой системы, и описаны ее главные элементы — магнитные зеркала. Для упрощения конструкции и повышения стабильности магнитного поля применены постоянные магниты.

To obtain short electron bunches with a large charge, special magnetic systems with a strong dependence of the time of flight on the particle energy, the so-called magnetic bunchers, are used. The paper considers one of the variants of such a system and describes its main elements — magnetic mirrors. To simplify the design and increase the stability of the magnetic field, permanent magnets are used.

PACS: 85.70.Ec; 41.85.–p

### ВВЕДЕНИЕ

Для многих технологических и исследовательских целей требуется получение коротких (пикосекундных) электронных сгустков с большим зарядом. При этом нормализованный эмиттанс электронного пучка тоже должен быть невелик. Такие сгустки можно получать группировкой (продольным сжатием) электронных сгустков с меньшим пиковым током. Для преодоления кулоновского расталкивания группировку следует проводить при релятивистских энергиях электронов в специальной магнитной системе с сильной зависимостью времени пролета от энергии частиц — так называемом магнитном группирователе. Несколько лет назад в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН была предложена оригинальная схема такого устройства [1], один из вариантов которой представлен на рис. 1.

Группирователь состоит из двух тридцатиградусных магнитов с параллельными краями и двух магнитных зеркал. Проходя последовательно через первый магнит с параллельными краями, большое магнитное зеркало, малое магнитное зеркало, снова большое магнитное зеркало и второй магнит с параллельными краями, электроны

---

<sup>1</sup>E-mail: proton7956@gmail.com

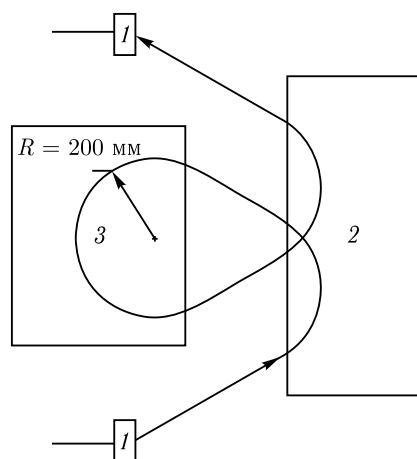


Рис. 1. Схема группирующей магнитной системы с поворотом на  $540^\circ$ : 1 — тридцатиградусные магниты; 2 — большое магнитное зеркало; 3 — малое магнитное зеркало. Опорная траектория электронов показана сплошной кривой

совершают поворот на  $30 + 120 + 240 + 120 + 30 = 540^\circ$ . Радиусы траектории в поворотных магнитах и расстояния между магнитами подобраны таким образом, что поворот является ахроматическим. Это значит, что горизонтальный угол и координата электрона, выходящего из последнего поворота магнита, не зависят (в линейном приближении) от отклонения энергии этого электрона от расчетной энергии (т. е. энергии опорной частицы). Группирователь предполагается установить в канал инжекции электронов с кинетической энергией около 1,5 МэВ на установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» [2]. Тридцатиградусные магниты уже существуют, поэтому в данной работе представлены только конструкция и результаты расчета поля магнитных зеркал.

## ОПИСАНИЕ МАГНИТОВ

Для получения высокой стабильности магнитного поля и удешевления системы в конструкции магнитных зеркал использованы постоянные магниты из сплава неодим–железо–бор, имеющие остаточную индукцию  $B_r$  около 13 кГс и энергетическое произведение  $(BH)_{\max}$  около 40 МГс·Э. При таких параметрах магнитов для минимизации их количества (полного объема магнитного материала) нужно получить индукцию в магнитах около 7 кГс. При этом необходимое поле в рабочем зазоре магнитов гораздо меньше (около 300 Гс). Поэтому для получения достаточно большой индукции в постоянных магнитах железный магнитопровод должен обеспечить концентрацию магнитного потока, проходящего через рабочий зазор, в объеме, занятом постоянными магнитами. При разработке геометрии магнитопроводов были выбраны стандартные плитки магнитного материала размерами  $40 \times 40 \times 20$  мм с намагниченностью вдоль коротких ребер. Схема магнитного зеркала приведена на рис. 2.

Большое и малое магнитные зеркала отличаются только некоторыми размерами и величиной поля в рабочем зазоре.

Первый этап разработки электронно-оптической схемы заключался в предварительной оценке величины поля, полученной с помощью метода приближенного аналитического расчета (метода Ротерса) [3]. Этот метод основан на известном в электро-

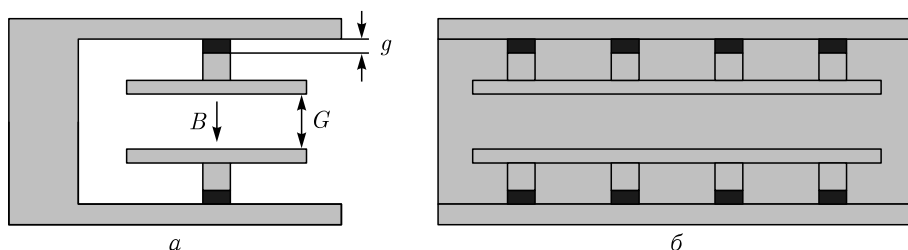


Рис. 2. Схема магнитного зеркала: а) вид сбоку; б) вид спереди. Черным цветом показаны плитки магнитного материала, серым — железные магнитопроводы, а стрелкой — направление вектора поля в рабочем зазоре

статике утверждению [4] о том, что электрический диполь с моментом  $d$ , внесенный в плоский конденсатор емкостью  $C$  с зазором  $g$ , создает разность потенциалов

$$U = \frac{d \cos \theta}{gC}, \quad (1)$$

где  $\theta$  — угол между направлением дипольного момента и нормалью к внутренней поверхности проводника. Так как при не слишком больших полях железо имеет большую магнитную проницаемость, железные магнитопроводы можно считать магнитными эквипотенциалами, а для расчета разности потенциалов можно применить формулу (1), заменив электрические диполи магнитными. Для магнито жестких материалов дипольный момент единицы объема (намагниченность) примерно равен  $B_r/(4\pi)$ , и поле в плоском рабочем зазоре высотой  $G$  (см. рис. 2) находится делением скалярного магнитного потенциала железного полюса на половину высоты зазора:

$$B = \frac{B_r S}{2\pi C G}, \quad B = \frac{U}{G/2}, \quad (2)$$

где  $S$  — суммарная площадь плиток магнитного материала в верхней половине магнита (предполагается, что высота этих плиток равна высоте  $g$  зазора между железным полюсом и экраном, находящимся под нулевым потенциалом);  $C$  — эквивалентная емкость одного (например, верхнего) полюса. Для расчетов магнитного поля обычно используют не эквивалентную емкость  $C$ , а магнитную проводимость  $4\pi C$ . Последняя равна отношению магнитного потока, вытекающего из полюса в отсутствие постоянных магнитов при заданном скалярном магнитном потенциале, к величине потенциала. Эта величина зависит от формы магнитопроводов и довольно легко оценивается [3]. Например, для зазора, заполненного магнитным материалом («плоского конденсатора»), магнитная проводимость примерно равна отношению площади зазора к его высоте  $S/g$ . Поток, вытекающий из верхнего полюса, является суммой потока через плоскость симметрии магнита и потока, уходящего в экран. Значительная часть второго потока проходит через относительно малый зазор для постоянных магнитов. Поэтому

$$4\pi C = \frac{2Sg}{G} + \frac{S}{g} + 4\pi C_p, \quad (3)$$

где  $S_G$  — эффективная площадь рабочего зазора, а  $C_p$  — паразитная эквивалентная емкость, описывающая часть потока из полюса в экран. Подставив (3) в (2), получим окончательное выражение для поля в рабочем зазоре:

$$B = \frac{B_r}{S_G/S + G/(2g) + 2\pi C_p G/S}. \quad (4)$$

По заданному полю  $B$  и толщине  $g$  плиток магнитного материала можно найти необходимую площадь плиток:

$$S = \frac{S_G + 2\pi C_p G}{B_r/B - G/(2g)}. \quad (5)$$

Как уже отмечалось выше, поле  $B$  в рабочем зазоре должно быть намного меньше остаточной индукции  $B_r$ , поэтому площадь плиток магнитного материала относительно мала, и они соединяются с полюсами отдельными железными проставками, как это показано на рис. 2.

## РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Следующий этап работы состоял в расчете поля с помощью CST Studio — программного пакета, реализующего функции системы автоматизированного проектирования и электромагнитного моделирования.

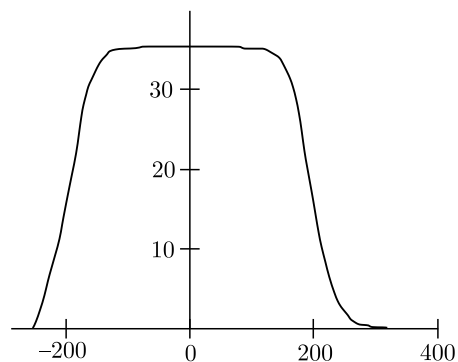


Рис. 3. Рассчитанная зависимость индукции магнитного поля (мТл) в медианной плоскости большого магнитного зеркала от координаты (мм) поперек края магнита

При этом оптимизировались размеры элементов магнитопровода для получения нужного поля в рабочих зазорах обоих магнитных зеркал при использовании минимального объема магнитного материала. Кроме того, оптимизировалось расположение плиток постоянных магнитов для получения необходимой однородности поля в рабочем зазоре. Один из результатов расчетов показан на рис. 3. При рабочем зазоре  $G = 84$  мм характерные значения  $B$  поля в медианной плоскости составляют примерно 330 и 220 Гс для малого и большого магнитных зеркал соответственно. Зависимость поля от расстояния до края магнита будет использована для уточнения формы траектории, показанной на рис. 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция магнитных зеркал для группирователя электронов с использованием постоянных магнитов. Применение постоянных магнитов позволило существенно удешевить магнитные зеркала, так как отпала необходимость использования дорогостоящих источников постоянного тока с высокой стабильностью и изготовления медных обмоток. Кроме того, вес магнитных зеркал на постоянных магнитах значительно меньше, чем для электромагнитного варианта.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vinokurov N. A., Parkhomchuk V. V., Skrinsky A. N.* RF Accelerator for Electron Cooling of Ultrarelativistic Hadrons // Proc. of the 12th Workshop on Beam Cooling. 2019. P. 26; <https://accelconf.web.cern.ch/cool2019/papers/tuy01.pdf>.
2. *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.
3. Постоянные магниты: Справ. / Ред. *Ю. М. Пятин*. М.: Энергия, 1980. 487 с.
4. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 624 с.

Получено 18 ноября 2022 г.