

## О возможности использования в разрезном микротроне постоянных поворотных магнитов с полями до 1Т

А.И. Карев (*ФИАН*), В.Н. Мелехин (*ИФП*), Н.П. Собенин (*МИФИ*),  
В.В. Шведун (НИИ ЯФ МГУ)  
Москва, Россия

Показана возможность создания постоянного поворотного магнита для разрезного микротрона на основе редкоземельных магнитных материалов. Обсуждается выбор оптимальных параметров магнита и формирование торцевого магнитного поля.

### Введение

Развитие технологии производства редкоземельных магнитных материалов (РЗММ) и освоение их промышленного производства явились предпосылкой для внедрения постоянных магнитов в ускорительную технику. Разработаны различные дипольные и мультипольные магниты для оптики пучков и конструкции ондуляторов ЛСЭ, в которых используются РЗММ [1]. В настоящей работе рассматривается возможность создания постоянных поворотных магнитов для разрезного микротрона.

Микротрон с РЗММ магнитами имеет ряд преимуществ по сравнению с ускорителем с традиционными 180-градусными электромагнитами: в нем отсутствуют системы питания и охлаждения обмоток, что ведет к увеличению надежности всей установки и снижению энергопотребления, упрощает управление ускорителем и снижает трудоемкость его обслуживания, уменьшает суммарный вес установки и общий полезный объем, требуемый для ее размещения. Эти преимущества могут иметь важное значение особенно, если ускоритель проектируется как транспортабельный комплекс, например для работы в составе автономной мобильной системы обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков [2]. Кроме того, магнитные характеристики РЗММ позволяют формировать на краю поворотных магнитов специальную форму магнитного поля, в большей степени удовлетворяющую требованиям оптики пучка, чем это удастся сделать в традиционных электромагнитах.

### Основные характеристики РЗММ

(а) РЗММ характеризуются чрезвычайно высоким значением коэрцитивной силы  $H_c$  и удельной энергией  $(BH)^{max}$ . Типичные значения этих параметров для трех различных РЗММ приведены в табл.1. Здесь же для сравнения показаны магнитные параметры двух магнитных материалов, традиционно используемых для постоянных магнитов.

Таблица 1. Магнитные характеристики магнито-твердых материалов.

	$H_c$ (kOe)	$B_r$ (kG)	$(BH)^{max}$ (MGOe)
SmCo <sub>5</sub>	7,8 - 9,0	9,0-10,2	20 - 22
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	8,2 - 10,0	9,4 - 11,1	25 - 27
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	9,2 - 11,4	12,0 - 14,0	35 - 40
Альнико	0,5-1,6	5,5-11,6	2-4
Ферриты	0,2-0,3	2,0-3,5	1,0-3,5

(б) Кривая намагниченности РЗММ во втором квадранте на плоскости Н-В практически совпадает с прямой линией. В силу этого магнит полностью восстанавливает свой магнитный поток после воздействия внешнего размагничивающего поля и после процедуры сборки-разборки.

(в) РЗММ обладают выраженной анизотропией, и их свойства описываются как

$$\mathbf{B}_{\parallel} = \mathbf{B}_r + \mu_0 \mu_{\parallel} \mathbf{H}_{\parallel} \quad \text{и} \quad \mathbf{B}_{\perp} = \mu_0 \mu_{\perp} \mathbf{H}_{\perp},$$

где индексы характеризуют направление по отношению к так называемой “легкой оси”; значения  $\mu_{\parallel}$  и  $\mu_{\perp}$  близки к 1, это означает, что РЗММ не концентрирует в своем объеме внешний магнитный поток.

(г) Демонстрируя устойчивость к ионизирующему излучению и приемлемые вакуумные свойства, РЗММ обладают повышенной зависимостью магнитных характеристик от температуры. Хотя известны методы подавления этой зависимости, однако для коммерческих РЗММ температурные коэффициенты для  $B_r$  достигают 0,1 %/С° и для  $H_c$  — 0,6 %/С°.

### Конфигурация магнитной цепи поворотного магнита

Существуют три основные конфигурации магнитной цепи для дипольного магнита С-типа, различающиеся положением РЗММ в железной арматуре магнита (рис.1). Генерация магнитного потока в рабочем зазоре  $\Phi_g$  сопровождается возникновением паразитного потока  $\Phi_p = \Phi_c + \Phi_a + \Phi_d$ , где  $\Phi_c$ ,  $\Phi_a$  и  $\Phi_d$  — потоки между элементами магнита а-а, b-b и с-с. Величина паразитного магнитного потока тем больше, чем выше разность потенциалов между соответствующими частями магнита. Видно, что в случае “с” падение магнитного потенциала в арматуре магнита минимально, а для варианта “а” — максимально.

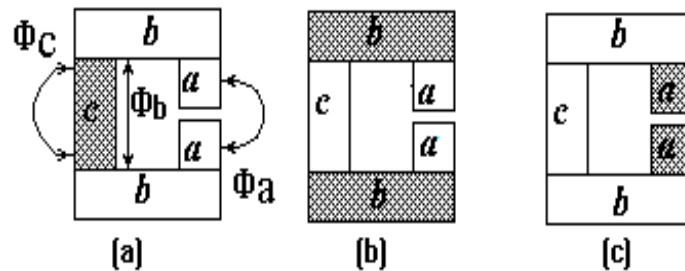


Рис.1. Конфигурации магнитной цепи дипольного магнита С-типа.

Этот вывод подтверждается результатами вычислений, выполненных по программе PANDIRA [3], откуда следует, что при прочих равных условиях величины индукции поля в зазоре  $B_g$  для конфигураций “а”, “b” и “с” относятся как 0,5/0,75/1,0.

### Выбор оптимальных параметров магнита

Обычно при разработке постоянных магнитов для минимизации необходимого количества магнитного материала рабочую точку стараются разместить вблизи точки  $(BH)^{max}$ . Можно показать, что для магнитов на основе РЗММ это условие будет соответствовать слою РЗММ на полюсах с суммарной толщиной  $h$ , равной высоте зазора  $g$  и значение  $B_g$  будет близко к  $m_0 H_c / 2$  (~0,5 Т). Однако для поворотного магнита разрезного микротрона условие минимизации объема РЗММ ( $V$ ) может не

соответствовать требованиям, предъявляемым к оптимальным параметрам магнита, поскольку значение  $B_g$ , кроме всего прочего, определяет размеры и вес магнита. Действительно, для ускорителя на заданную энергию увеличение  $B_g$  потребует увеличения толщины слоя РЗММ, однако при этом площадь полюса будет уменьшаться, как  $\sim 1/B_g^2$ , и рост функции  $V(B_g)$  замедлится. Кроме того, увеличение  $B_g$  приведет к уменьшению магнитного потока в арматуре магнита и, если проектное значение максимальной индукции в железе останется неизменным, вес магнита  $P$  будет снижаться.

На рис.2 приведены зависимости относительного веса магнита  $P/P_0$  и требуемого объема РЗММ  $V/V_0$  от значения индукции в рабочем зазоре, где  $P_0$  — вес магнита при  $B_g=1$  Т, а  $V_0$  соответствует объему РЗММ при  $h=g$ . Из представленных кривых видно,

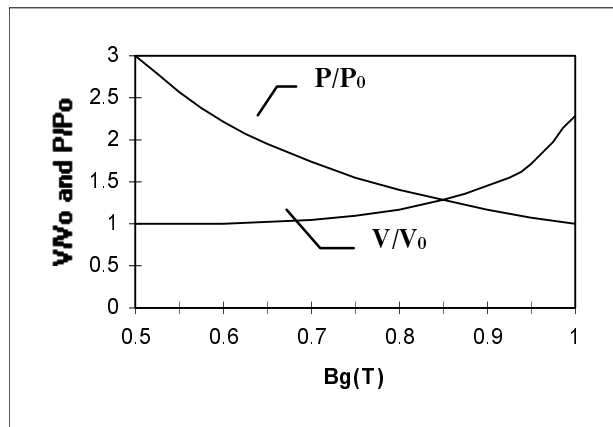
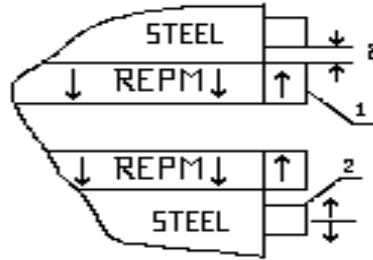


Рис.2. Зависимость  $P/P_0$  и  $V/V_0$  от  $B_g$ .

что для небольших микротронов на энергию 10-20 МэВ с относительно легкой и дешевой железной частью магнита оптимальное значение  $B_g$  лежит в диапазоне 0,6-0,8Т. Для ускорителей на энергию 50-100 МэВ границы приемлемых значений  $B_g$  следует сдвинуть в область больших значений, чтобы снизить вес, размеры и стоимость магнитов. По этой причине в проекте разрезного микротротрона на энергию 70 МэВ [5] было выбрано значение  $B_g=0,9$  Т. При этом для одного магнита с  $h=2$  см потребуется  $\sim 14,5$  дм<sup>3</sup> РЗММ.

### Формирование поля у торца магнита

Для подавления вертикальной дефокусировки пучка, вызванной действием естественного рассеянного поля, у края поворотного магнита можно сформировать участок с полем, имеющим обратную направленность [4]. При этом уменьшается эффективный диаметр первой орбиты  $D_{eff}$ , что усугубляет трудности, связанные с обходом пучком ускоряющей структуры. Величина уменьшения  $D_{eff}$  зависит от расстояния между участком с обратным полем и границей области основного ведущего поля  $d$ . В обычных магнитах обратное поле формируется с помощью стальных полюсов и катушек, при этом расстояние  $d$  не может быть слишком малым, поскольку возникающий паразитный магнитный поток разрушает требуемую конфигурацию магнитного поля на краю магнита.



**Рис.3.** Конфигурация магнитной цепи на краю магнита. 1 — РЗММ с обратной намагниченностью, 2 — подвижный стальной элемент.

Для увеличения  $D_{\text{eff}}$  можно использовать уникальные магнитные свойства РЗММ, позволяющие разместить магнитный материал с обратным направлением намагниченности вплотную к РЗММ, формирующему основное ведущее поле (рис.3). Как следует из результатов компьютерного моделирования, замена электромагнита РЗММ магнитом позволяет в разрезном микротроне на энергию 70 МэВ увеличить  $D_{\text{eff}}$  с 27 до 40 мм. Кроме того, предложенная конфигурация магнитной цепи обеспечивает необходимую точную настройку формы торцевого поля. Изменение величины воздушного зазора от 0 до 5 мм за счет перемещения стального элемента конструкции ведет к 15% уменьшению амплитуды противопололя.

### **Заключение**

Уникальные свойства редкоземельных магнитных материалов позволяют разработать постоянный магнит для разрезного микротрона с полем до 1 Т и сформировать торцевое поле с более высокими оптическими характеристиками, чем в электромагнитах.

### **Литература**

- [1] Halbach K. J. Appl. Phys. 1985, v.57, pp.3605-3608.
- [2] Trower W.P., Karev A.I., Melekhin V.N., Shvedunov V.I., Sobenin N.P. Nucl. Instr&Meth. B99 (1995) 736-738
- [3] J.L.Warren, M.T.Menzel, G.Boicourt, H.Stokes, R.K.Cooper . Los Alamos National Laboratory, LA-UR-87-126, 1987.
- [4] Babic H., Sedlacek M. Nucl.Instr&Meth, v.56, (1967), 170-172.
- [5] Shvedunov V.I., Karev A.I., Melekhin V.N., Sobenin N.P. Trower W.P. Proc. of the 1995 Particle Accelerator Conference, May 1-5, 1995, Dallas, USA, v. 2, 1375-1377.