

УДК 621.384.63

КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

*С. А. Тюрин^{а, б}, А. Н. Ермаков^{а, б}, А. М. Козодаев^б,
Вл. С. Скачков^б, Вик. С. Скачков^в*

^аНаучно-исследовательский институт ядерной физики, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

^бФизический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

^вИнститут теоретической и экспериментальной физики, Москва

^гНаучно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии, Москва

Сообщается о разработке и изготовлении редкоземельной квадрупольной линзы, предназначенной для восстановления фокусировки ускорителя И-100. Конструкция линзы соответствует недавно разработанной магнитной системе — QSM. Описана методика ее настройки, а также представлены результаты магнитных измерений.

Results of development and manufacturing of a rare earth quadrupole lens intended for recovery of I-100 accelerator focusing are presented. The quadrupole lens design corresponds to recently developed magnetic system — QSM. The technique of its tuning and results of magnetic measurements are described.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время предпринимаются шаги по организации Центра ионной лучевой терапии радиорезистентных онкологических заболеваний с помощью ускоренных ионов углерода на базе существующего в ИФВЭ ускорительного комплекса [1]. Ускорительный комплекс ИФВЭ имеет в своем составе линейный ускоритель-инжектор ЛУ-30, бустер, протонный синхротрон У-70, а также линейный ускоритель И-100 (бывший инжектор синхротрона У-70), который предполагается использовать для инъекции в бустер ионов углерода. Линейный ускоритель И-100 спроектирован для ускорения протонов до энергии 100 МэВ. Канал ускорения И-100 состоит из электростатического форинжектора, согласующего канала с банчером, трех резонаторов и дебанчера. Со времени запуска в 1960-х гг. и по настоящее время ускоритель протонов И-100 проработал практически без серьезных аварий.

Однако в результате выхода из строя первой полутрубки фокусирующего канала ионный ток на выходе ускорителя упал практически до нуля. Аналогичное происшествие постигло ускоритель И-2, являвшийся моделью И-100, в 1983 г., когда к такому же результату привел выход из строя квадрупольной линзы согласующего канала, находящегося в высоковакуумном объеме ускорителя [2].

Для восстановления работоспособности ускорителя И-100 было принято решение воспользоваться имевшимся опытом по ремонту И-2, который удалось выполнить без вскрытия высоковакуумного резонатора, и путем изготовления и установки в ускорителе

малогабаритной квадрупольной линзы с эквивалентными магнитными параметрами восстановить фокусировку. Магнитотвердая квадрупольная линза предназначена для установки в согласующем канале ускорителя И-100 вместо вышедшей из строя квадрупольной линзы входной полутрубки. Линза должна обеспечить согласование пучка форинжектора с ионно-оптической системой первого резонатора.

1. КОНСТРУКЦИЯ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛИНЗЫ

Ввиду существенных ограничений на габариты квадрупольной линзы круг возможных для применения магнитных систем, обеспечивающих требуемый интеграл градиента, сузился до неявнополюсных квадрупольей на постоянных магнитах, среди которых недавно разработанный класс магнитов QSM (Quasi-Sheet Multipole [3]) отличается относительной простотой формы магнитных элементов. Неоднородность магнитных характеристик современных постоянных редкоземельных магнитов (РЗМ) по объему отдельно взятого магнитного элемента обычно невысока. Это позволяет часто использовать РЗМ в магнитных системах, не содержащих полюсных наконечников и даже ярма. При этом иногда удается создавать магнитные поля с прецизионными характеристиками. На рис. 1, а показана схема магнитной системы QSM для симметричной квадрупольной линзы, когда рабочая область представляет собой цилиндр радиусом r_0 . Магнитное поле в ней возбуждается РЗМ треугольной формы на основе сплава Nd-Fe-B, обеспечивающего наименьшие габариты.

Основная идея системы QSM заключается в точном размещении редкоземельных магнитов вокруг рабочей области таким образом, что магнитное поле в ней может считаться создаваемым бесконечно тонкими макроскопическими токами, текущими по поверхности ярма квадрупольной линзы. В общем случае по мультипольности $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ уравнение связи между плотностью поверхностных молекулярных токов и параметрами профиля ярма в системе QSM имеет вид

$$\frac{1}{k} \frac{b_0}{\mu_0 I} r_p^k \sin k\varphi = r_p \cos(\varphi - \psi) + C, \quad (1)$$

где b_0 — рабочее поле в апертуре, заданное на единичном расстоянии от оси z ; μ_0 — магнитная постоянная; C — параметр семейства; ψ — угол наклона намагниченности I

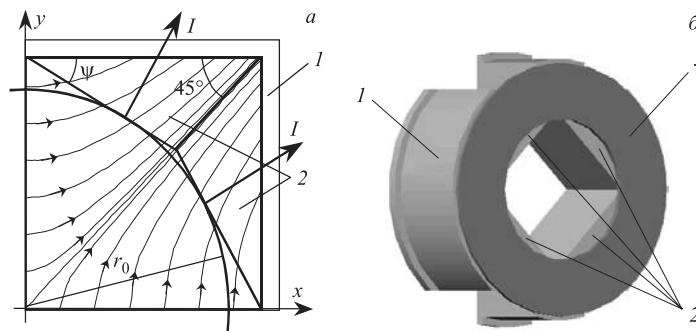


Рис. 1. а) Схема симметричной квадрупольной линзы типа QSM; б) общий вид квадруполья. Здесь 1 — ярмо; 2 — постоянные магниты; 3 — регулировочный диск

к оси x . Это уравнение определяет множество всех возможных профилей $r_p(\varphi)$ магнитопровода, обеспечивающих формирование магнитного поля заданной мультипольности k . Задав нужный профиль системы из N магнитных блоков, константу b_0 , мультипольность k , намагниченности блоков I_1, I_2, \dots, I_N , можно определить QSM-систему путем вычисления углов ψ_n на основании уравнения (1).

При $k = 2$ уравнение (1) дает профили магнитопровода для всех возможных QSM-квадрупольей:

$$\frac{b_0}{2 \mu_0 I} r_p^2 \sin 2\varphi = r_p \cos(\varphi - \psi) + C, \quad (2)$$

которое в частном случае, когда $C = -\frac{\mu_0 I}{2b_0} \sin 2\psi$, является уравнением пары прямых, пересекающихся в точке с координатами $x_c = -C/\cos \psi$, $y_c = -C/\sin \psi$. В этом случае внутренняя поверхность магнитопровода имеет прямоугольную форму, а при $\psi = 45^\circ$ квадрупольная линза становится симметричной (рис. 1, а).

Преимуществами QSM как магнитной системы являются:

- возможность получения чистого мультипольного поля во всем объеме рабочей области;
- возрастание эффективности при возрастании отношения поперечных размеров рабочей области по сравнению с другими известными конструкциями, в том числе также неавтополюсными;
- возможность использования стандартных блоков РЗМ;
- отсутствие в системе магнитомягких элементов конструкции, кроме магнитопровода;
- возможность плавного и непрерывного изменения объема магнитного материала для достижения заданного поля.

Форма магнитных элементов максимально упрощается, когда угол ψ выбирается равным 45° . В этом случае два магнитных элемента, расположенных в одном и том же квадранте, могут быть заменены одним блоком; такая линза изображена на рис. 1, б. Конструкцией линзы предусмотрена возможность разборки и повторной многократной сборки на апертурной трубке, а также фиксации на фланце в произвольном положении, для чего используется специальное прижимное кольцо. При юстировке в ускорителе линза путем вращения на апертурной трубке устанавливается в необходимом положении и фиксируется с помощью прижимного кольца.

2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И НАСТРОЙКА ЛИНЗЫ

Для создания квадрупольного поля линзы использовались два типа магнитных блоков в форме параллелепипеда размерами $22,5 \times 22,5 \times 38$ мм, различающихся направлением намагниченности. Треугольные магнитные блоки вырезаны алмазным инструментом и прикреплены к ядру с помощью специального двухкомпонентного клея, обеспечивающего необходимую прочность соединения (в том числе, в вакууме) через 1,5 сут после склеивания.

Магнитные измерения выполнены с помощью датчика холловского магнитометра. Точность позиционирования датчика по двум декартовым координатам составляет 0,01 мм. Минимальный измеряемый сигнал определялся дискретностью вольтметра и

составил 1 мкВ. Калибровка датчика осуществлялась в однородном поле магнита из сплава Sm-Co. В целях учета влияния стенки резонатора, выполненной из магнитомягкого материала, при измерениях и настройке продольного интеграла градиента линзы использовался стальной экран толщиной 2 мм.

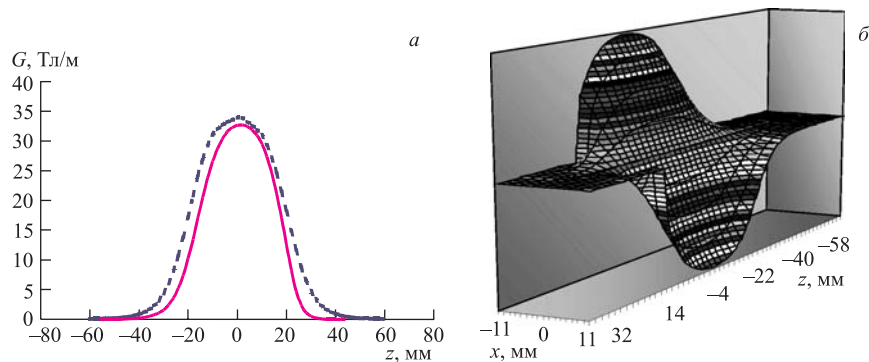


Рис. 2. а) Продольное распределение градиента: начальное (штриховая линия) и конечное (сплошная линия); б) распределение поперечной компоненты поля в медианной плоскости xz

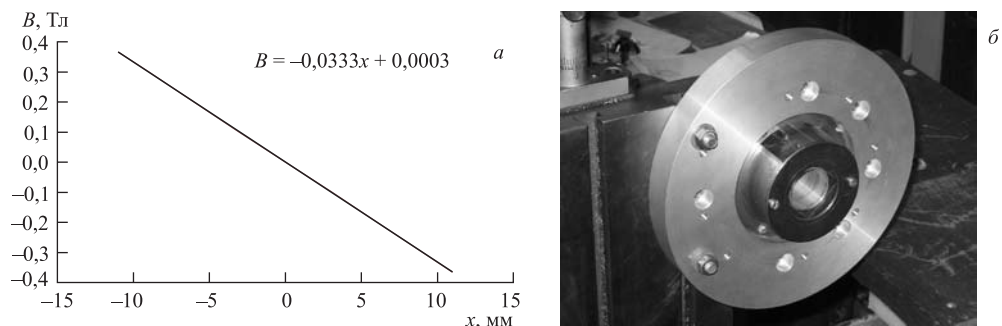


Рис. 3. а) Распределение поперечной компоненты поля в медианной плоскости при $z = 0$; б) квадрупольная линза, установленная на алюминиевом фланце

Измерения, выполненные непосредственно после сборки линзы, показали, что нелинейность поля и отклонение магнитной оси линзы от геометрической оси апертурной трубки находятся в пределах заданных допусков. Поэтому настройка магнитного поля линзы свелась к измерению градиента магнитного поля линзы и подгонке интеграла градиента. Начальное распределение градиента $G(z)$ в линзе, свободной от экранов, показано на рис. 2, а штриховой линией. Исходное значение интеграла составляло 1,42 Тл, что примерно на 20 % отличалось от заданного.

На первом шаге подгонки путем уменьшения геометрических размеров магнитных блоков с 40 до 36 мм отклонение интеграла градиента снижено до $-3,94\%$. Дальнейшая настройка опробована двумя путями:

- изменением положения переднего экрана линзы. При сдвиге экрана на 1 мм относительно ярма значение продольного интеграла увеличилось на $0,8\%$;

- изменением внутреннего диаметра отверстия в переднем экране. При увеличении диаметра этого отверстия с 29 до 40 мм достигнута точность подгонки 0,36 %. Положение переднего экрана относительно ярма при этом оставалось неизменным. Окончательный вид распределения поперечной компоненты поля в медианной плоскости xz показан на рис. 2, б.

На рис. 3, а представлена характеристика поля, измеренная в центральной поперечной плоскости $z = 0$. Линейный характер изменения поля в медианной плоскости сохраняется с точностью не хуже 3 % до значений поперечной координаты, превышающей радиус апертуры. В частности, продольный интеграл от поля на отрезке $x \in [-6, 6]$ мм линеен с точностью 1 %. Внешний вид квадрупольной линзы показан на рис. 3, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и настроена магнитотвердая квадрупольная линза на основе сплава Nd-Fe-B, предназначенная для установки в согласующем канале ускорителя И-100. При проектировании линзы применялась система QSM. За счет использования данной системы спроектирована линза длиной 40 мм, что сравнимо с апертурой рабочей области линзы, составляющей 29 мм. Система QSM обеспечивает допуск на отклонение магнитной оси линзы от геометрической оси апертурной трубки в пределах заданных значений 50 мкм. Максимальный нерегулируемый градиент линзы 33,3 Тл/м. Заданное значение продольного интеграла градиента было достигнуто путем изменения геометрических размеров составляющих линзу магнитных блоков. Тонкая подстройка этого значения велась путем изменения положения переднего экрана линзы, а также путем изменения диаметра входного отверстия в переднем экране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипов Ю. М. и др.* Ускорение ионов в линейном ускорителе И-100 // Тр. XVII совещ. по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 2000. Т. II. С. 385.
2. *Капчинский И. М. и др.* Опыт использования неявнополюсных квадрупольных линз с постоянными магнитами на линейном ускорителе И-2 // Тр. IX Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1985. Т. II. С. 57.
3. *Skachkov V. S.* Quasi-sheet multipole permanent magnets // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 500, Nos. 1–3. P. 43–54.