

Научная статья

УДК 537.626

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-72-80

Квадруполь на постоянных магнитах для финального фокуса*

Евгений Игоревич Антохин¹, Владимир Сергеевич Елисеев
Виталий Викторович Зуев, Адил Ислам оглы Микайылов
Мария Дмитриевна Буцыкина, Алексей Юрьевич Пахомов
Константин Владимирович Жилиев, Владимир Александрович Востриков
Тания Равильевна Дербышева

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

¹antokhin@inp.nsk.su

Аннотация

Представлена общая теория постоянных мультипольных магнитов и описана конструкция квадрупольного магнита типа Halbach-2 в качестве линзы финального фокуса для коллайдеров и аналогичных проектов. Исследуются оптимальные положения сегментов постоянных магнитов и условия для создания квадрупольного поля. Приведены характеристики квадрупольного поля, такие как апертура, градиент, интеграл градиента, длина и количество сегментов. Обсуждаются результаты измерений и расчетов, а также возможности для регулировки градиента.

Ключевые слова

постоянные магниты, квадрупольная линза, финальный фокус

Для цитирования

Антохин Е. И., Елисеев В. С., Зуев В. В., Микайылов А. И., Буцыкина М. Д., Пахомов А. Ю., Жилиев К. В., Востриков В. А., Дербышева Т. Р. Квадруполь на постоянных магнитах для финального фокуса // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 72–80. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-72-80

Permanent Magnet Quadrupole for the Final Focus

Evgeny I. Antokhin¹, Vladimir S. Eliseev, Vitaly V. Zuev, Adil Mikaiylov
Maria D. Butskina, Alexey Yu. Pakhomov, Konstantin V. Zhiliaev
Vladimir A. Vostrikov, Tania R. Derbysheva

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

¹antokhin@inp.nsk.su

Abstract

The paper presents the general theory of permanent multipole magnets and describes the design of a Halbach-2 type quadrupole magnet as a final focus lens for colliders and similar projects. Optimal positions of permanent magnet seg-

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Антохин Е. И., Елисеев В. С., Зуев В. В., Микайылов А. И., Буцыкина М. Д., Пахомов А. Ю., Жилиев К. В., Востриков В. А., Дербышева Т. Р., 2024

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 3
Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 3

ments and conditions for quadrupole field generation are investigated. Characteristics of the quadrupole such as aperture, gradient, gradient integral, length and number of segments are given. The results of measurements and calculations as well as the possibilities for gradient adjustment are discussed.

Keywords

permanent magnets, quadrupole lens, final focus

For citation

Antokhin E. I., Eliseev V. S., Zuev V. V., Mikaiylov A. I., Butskina M. D., Pakhomov A. Yu., Zhiliaev K. V., Vostrikov V. A., Derbysheva T. R. Permanent magnet quadrupole for the final focus. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 72–80 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-72-80

Введение

Постоянные магниты широко применяются в ускорителях для создания квадрупольных полей, в том числе для создания квадрупольного поля финального фокуса, который играет решающую роль в качестве фокусировки пучка частиц. В данной статье рассматривается конструкция квадрупольной линзы типа Halbach-2 в качестве линзы финального фокуса для проектов электрон-позитронных коллайдеров.

Общая теория постоянных мультипольных магнитов состоит в определении оптимального положения элемента постоянного магнита на $(r_c; 0)$ с намагниченностью вдоль оси X и элемента, помещенного в произвольный угол $(r_c; \alpha)$, намагниченность которого составляет угол β с осью X (рис. 1).

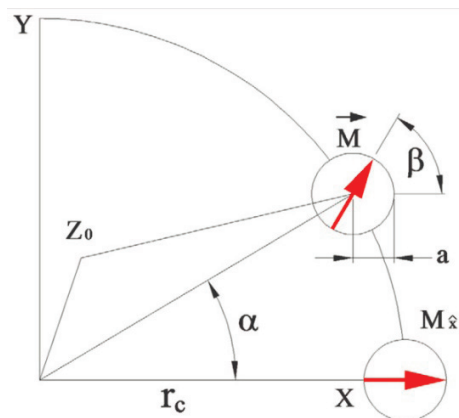


Рис. 1. Диаграмма намагниченности сегментов постоянных магнитов для создания квадрупольного поля

Fig. 1. Magnetization diagram of permanent magnet segments to create a quadrupole field

Формула для определения величины градиента описана в [1–3].

$$G = B_r \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right), \quad (1)$$

где B_r – намагниченность постоянного магнита, r – внутренний радиус, R – внешний радиус.

На практике непрерывное изменение вектора намагниченности элементов заменяют дискретным, т. е. вектор намагниченности имеет постоянное направление в пределах одного и того же сегмента конусообразной формы. При этом для создания квадрупольного поля необходимо выполнить условие: $(\beta_N - 3\alpha_N) = 3\pi/2$, где N находится в пределах от 1 до M (M – количество сегментов).

При выборе количества сегментов постоянных магнитов необходимо учитывать требуемую однородность градиента, а также его величину с одной стороны и технологичность сборки квадруполя – с другой. Обычно требуется не менее 16 сегментов для создания градиента с достаточно высокой однородностью.

Основные требования к квадруполю финального фокуса описаны в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры квадруполя

Table 1

Main parameters of the quadrupole	
Параметр	Значение
Апертура	36 мм
Градиент в центре	(5–6) кГс/см
Интеграл градиента	(40–45) кГс
Однородность интеграла градиента	10^{-3}
Длина квадруполя	82 мм
Внешний диаметр	75 мм
Постоянные магниты	NdFeB
<i>Br</i>	1,3 Т

Магнитные расчеты квадруполя

Для реализации параметров, указанных в табл. 1, была выбрана магнитная конфигурация, состоящая из 24 сегментов с направлениями намагниченности согласно рис. 2.

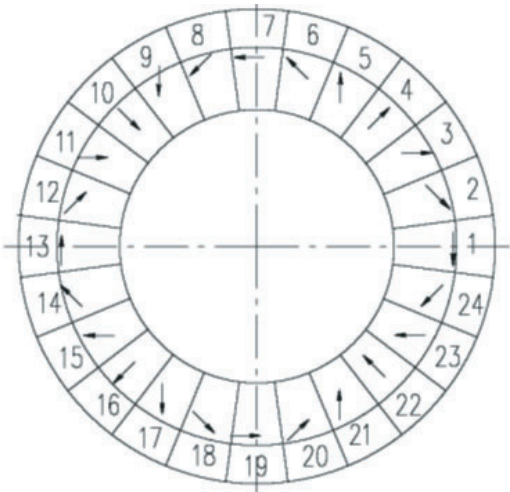


Рис. 2. Расположение намагниченных сегментов и направления векторов намагниченности в них для квадруполя

Fig. 2. Location of magnetized segments and directions of magnetization vectors in them for a quadrupole

Такое количество сегментов обеспечивает высокую однородность градиента, при этом рассеянное поле снаружи квадруполя почти равно нулю.

Для 3D-метода конечных элементов расчетов квадруполя был использован программный пакет MERMAID [4], общий вид постпроцессора которого изображен на рис. 3.



Рис. 3. Конфигурация магнитных секторов при задании метода конечных элементов в программе магнитостатики MERMAID (показана $\frac{1}{4}$ симметрия)

Fig. 3. Configuration of magnetic sectors when specified in the finite element method of the magnetostatics program MERMAID ($\frac{1}{4}$ symmetry shown)

Расчеты выполнялись с учетом наклона величины намагниченности постоянных магнитов $dM/dH = 1,05$. Точность расчетов соответствует уровню 10^{-4} для безжелезной конструкции.

Рис. 4 показывает однородность градиента в поперечном направлении, а табл. 2 – гармонический состав на радиусе $R = 1$ см.

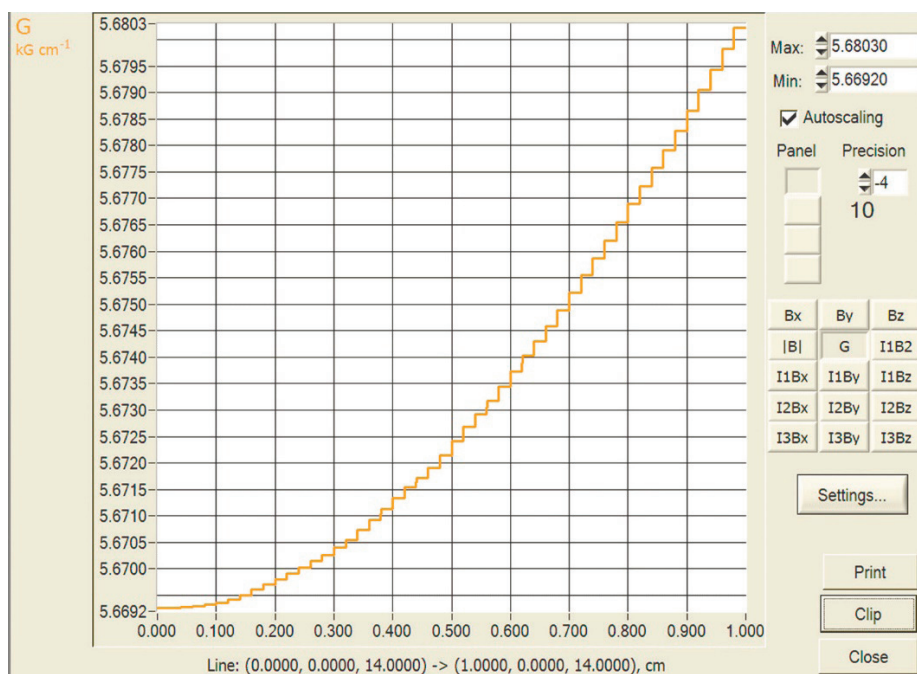


Рис. 4. Однородность градиента в поперечном направлении

Fig. 4. Homogeneity of the gradient in the transverse direction

Таблица 2

Гармонический состав на радиусе $R = 1$ см по результатам расчетов

Table 2

Harmonic composition at the radius $R = 1$ cm according to the results of calculations

Номер гармоники	A_n кГс $\times$ см	B_n кГс $\times$ см
1	0	0
2	41,464	0
3	0	0
4	-0,0004	0
5	0	0
6	-0,024	0
7	0	0
8	-0,000	0
9	0	0
10	-0,022	0
11	0	0
12	-0,0000	0
13	0	0
14	-0,019	0
15	0	0
16	0,000	0
17	0	0
18	-0,018	0

Конструкция квадруполя

При конструировании квадруполя на постоянных магнитах были учтены следующие факторы:

- точность сборки не хуже 0,2 мм;
- необходимость обеспечения повторяемости сборки;
- наличие больших магнитных сил, направление которых меняется при укладке сегментов по азимуту;
- отсутствие размагничивающего поля при установке сегментов.

Для обеспечения вышеупомянутых требований при сборке сегменты постоянных магнитов размещаются на временном технологическом стальном стержне в азимутальном порядке, соответствующем рис. 2. При этом сегменты притягиваются к стальному стержню, что исключает возникновение размагничивающих полей для соседних сегментов. Стальной стержень вместе с сегментами устанавливается внутрь металлического конусообразного корпуса, после чего одновременно происходит обжатие сегментов корпусом и удаление стального стержня. Конструкция квадруполя изображена на рис. 5.

Рис. 6 и 7 показывают изображения собранного квадруполя и отдельных сегментов соответственно. Сегменты вдоль продольного размера выполнены в виде конуса, аналогичную форму имеет бандажирующий металлический корпус. Такая форма квадруполя позволяет более эффективно применять его в качестве финального фокуса, предполагая разлет продуктов реакции вдоль внешнего радиуса квадруполя.

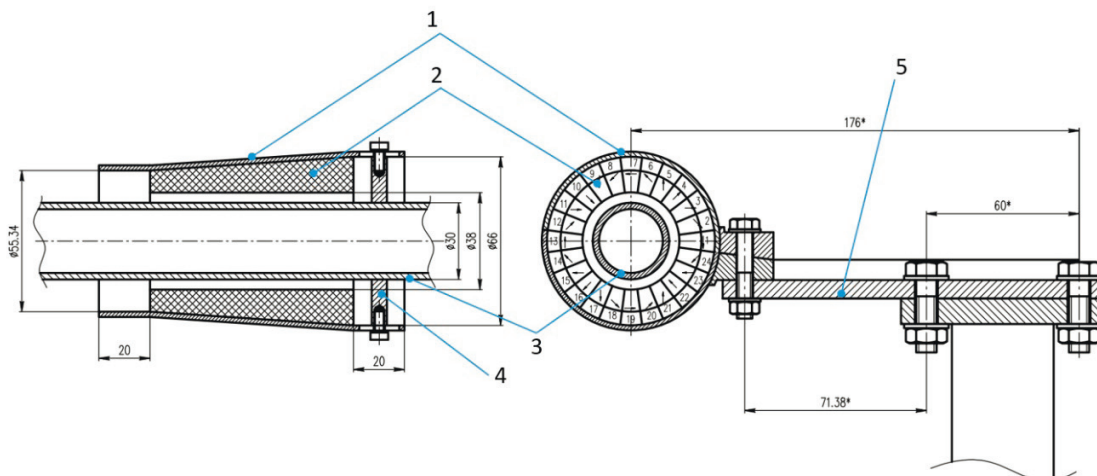


Рис. 5. Конструкция квадрупольной линзы:

1 – корпус; 2 – сегменты постоянных магнитов; 3 – вакуумная камера; 4 – стопорное кольцо; 5 – подставка

Fig. 5. Design of the quadrupole lens:

1 – housing; 2 – permanent magnet segments; 3 – vacuum chamber; 4 – retaining ring; 5 – stand



Рис. 6. Фотография собранного квадрупольа

Fig. 6. Photo of the assembled quadrupole



Рис. 7. Фотография отдельных сегментов постоянных магнитов

Fig. 7. Photograph of individual permanent magnet segments

Результаты измерений

Магнитные измерения проводились вращающейся катушкой на стенде магнитных измерений ИЯФ СО РАН [5]. Рис. 8 показывает общий вид измерительной установки. Табл. 3 представляет измеренный интегральный гармонический состав на $R = 1$ см.

Относительная точность измерений составила порядка 2×10^{-4} с высокой повторяемостью измерений (не хуже 5×10^{-5}).



Рис. 8. Общий вид измерительной установки
Fig. 8. General view of the measuring device

Таблица 3

Интегральный гармонический состав, измеренный на $R = 1$ см

Table 3

Integral harmonic composition measured at $R = 1$ cm	
Номер гармоники	Амплитуда, $\text{кГс} \times \text{см}$
1	0,35244
2	38,6402
3	0,22875
4	0,11264
5	0,02687
6	0,02816
7	0,01144
8	0,00976
9	0,00640
10	0,00352
11	0,00410
12	0,00576
13	0,00448
14	0,00392
15	0,00728

Выводы

Измерение квадруполь показывает достижение интеграла градиента порядка 40 кГс при эффективной длине 82 мм (градиент в центре около 4,8 кГс/см). Это хорошо соответствует результатам расчетов для 3D-модели.

Некоторое отличие величины градиента для расчетов и измерений объясняется выбором конической формы сегментов вдоль оси пучка. Такая форма постоянных магнитов не может быть введена точно в программном комплексе MERMAID 3D, а только в виде ступенчатой аппроксимации вдоль оси пучка.

Достигнута однородность интеграла градиента порядка 0,8 %, что объясняется неточностью сборки сегментов и разбросом вектора намагниченности между сегментами. Такая однородность типична для квадруполь данного типа и может быть существенно улучшена введением радиальной регулировки положения каждого сегмента. Сдвиг интегральной магнитной оси вследствие наличия небольшой дипольной компоненты составил 0,1 мм и может быть легко компенсирован общим смещением квадруполь в поперечном направлении.

При дальнейшей работе также предполагается иметь возможность для изменения апертуры квадруполь (изменения величины градиента) путем радиального перемещения сегментов.

Таким образом, квадруполь может быть рекомендован в качестве линзы финального фокуса для проекта с-тау фабрики и других аналогичных проектов.

Список литературы

1. **Ghaith A, Oumbarek D, Kitégi C, Valléau M, Marteau F, Couprie M-E.** Permanent Magnet-Based Quadrupoles for Plasma Acceleration Sources // *Instruments*. 2019. Vol. 3(2). P. 27. <https://doi.org/10.3390/instruments3020027>
2. **Tsoupas N., Brooks S., Jain A., Mahler G., Méot F., Ptitsyn V., Trbojevic D.** Main Magnets and Correctors for the CBETA and eRHIC Projects, and Hadron Facilities // *Physics Procedia*. 2017. Vol. 90. P. 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.045>
3. **Blümler P.** Proposal for a permanent magnet system with a constant gradient mechanically adjustable in direction and strength // *Concepts Magn. Reson.* 2016. Vol. 46. P. 41–48. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.21320>
4. **Dubrovин A. N.** User's Guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. SIM Limited, Novosibirsk Department, 1994.
5. **Mikhailov S., Gavrilov N., Rouvinsky E., Zhiliaev K. et al.** Dipole and quadrupole magnets for the Duke FEL booster // *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference*, Knoxville, TN, 16–20 мая 2005 года. Knoxville, TN, 2005. P. 4147–4149. DOI 10.1109/PAC.2005.1591746. – EDN MRFGNL.

References

1. **Ghaith A, Oumbarek D, Kitégi C, Valléau M, Marteau F, Couprie M-E.** Permanent Magnet-Based Quadrupoles for Plasma Acceleration Sources. *Instruments*, 2019, vol. 3(2), p. 27. <https://doi.org/10.3390/instruments3020027>
2. **Tsoupas N., Brooks S., Jain A., Mahler G., Méot F., Ptitsyn V., Trbojevic D.** Main Magnets and Correctors for the CBETA and eRHIC Projects, and Hadron Facilities. *Physics Procedia*, 2017, vol. 90, pp. 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.045>.
3. **Blümler P.** Proposal for a permanent magnet system with a constant gradient mechanically adjustable in direction and strength. *Concepts Magn. Reson.*, 2016, vol. 46, pp. 41–48. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.21320>
4. **Dubrovин A. N.** User's Guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. SIM Limited, Novosibirsk Department, 1994.

5. **Mikhailov S., Gavrilov N., Rouvinsky E., Zhiliaev K. et al.** Dipole and quadrupole magnets for the Duke FEL booster. *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN*, 16–20 May 2005. Knoxville, TN, 2005, pp. 4147–4149. DOI 10.1109/PAC.2005.1591746. – EDN MRFGNL.

Сведения об авторах

Антохин Евгений Игоревич, научный сотрудник

Елисеев Владимир Сергеевич, инженер-исследователь

Зуев Виталий Викторович, ведущий инженер

Микайылов Адил Ислам оглы, ведущий конструктор

Буцыкина Мария Дмитриевна, лаборант

Пахомов Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник

Жиляев Константин Владимирович, младший научный сотрудник

Востриков Владимир Александрович, научный сотрудник

Дербышева Тания Равильевна, аспирант, инженер-исследователь

Information about the Authors

Evgeny I. Antokhin, Research Scientist

Vladimir S. Eliseev, Research Engineer

Vitaly V. Zuev, Leading Engineer

Adil Islam oglu Mikayilov, Lead Designer

Maria D. Butsykina, Laboratory Assistant

Alexey Yu. Pakhomov, Junior Researcher

Konstantin V. Zhilyaev, Junior Researcher

Vladimir A. Vostrikov, Research Scientist

Tania R. Derbysheva, Postgraduate Student, Research Engineer

*Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2024;
принята к публикации 04.03.2024*

*The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 13.02.2024;
accepted for publication 04.03.2024*