

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Квадрупольная линза и магниты вывода компактного разрезного микротрона

И. Ю. Владимиров^{1,a}, Н. И. Пахомов¹, В. И. Шведунов^{1,b}, Ю. А. Кубышин²,
Х. П. Ригла³, В. В. Захаров⁴

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Технический университет Каталонии. Испания, 08028, Барселона, просп. Диагональ, д. 647.

³Центр ИЗМ. Испания, 46022, Валенсия, ул. Вера, 8В.

⁴ООО «Техномаг». Россия, 248033, Калуга, 2-й Академический пр., д. 13.

E-mail: ^atimerke@mail.ru, ^bshved@depni.sinp.msu.ru

Статья поступила 04.08.2014, подписана в печать 26.08.2014.

Компактный разрезной микротрон (РМ) на максимальную энергию 12 МэВ, который создается Техническим университетом Каталонии, содержит квадрупольную линзу для горизонтальной фокусировки пучка и четыре дипольных магнита для вывода пучка из ускорителя. В качестве источника магнитного поля в этих магнитах используется редкоземельный магнитный материал (РЗММ). В статье описываются основные характеристики квадрупольной линзы и магнитов вывода, а также процедура настройки их магнитных полей.

Ключевые слова: компактный разрезной микротрон, квадрупольная линза, дипольный магнит вывода, настройка магнитного поля.

УДК: 53.06. PACS: 07.55.Db.

Введение

Технический университет Каталонии совместно с НИИЯФ МГУ и СИЕМАТ (Мадрид) строят компактный разрезной микротрон (РМ), который предназначен для интраоперационной лучевой терапии и может быть использован в радиологии и диагностических комплексах. Этот компактный ускоритель был предложен в [1], состояние работ по созданию РМ описано в [2].

Схема РМ изображена на рис. 1. РМ состоит из электронной пушки 1, линейного ускорителя 2 с четырьмя ускоряющими ячейками и тремя ячейками связи, двух поворотных магнитов М1 3 и М2 4 и квадрупольной линзы 5. Эти элементы закрепляются на общей жесткой платформе, которая помещается в вакуумную камеру. Электронный пучок может быть выведен из орбит с энергиями пучка 6, 8, 10 и 12 МэВ с помощью магнитов вывода 6. При этом пучок проходит вдоль общей траектории вывода 7. Основные параметры РМ приведены в табл. 1.

Квадрупольная линза фокусирует пучок в горизонтальной медианной плоскости поворотных магнитов. Дефокусировка пучка квадрупольной линзой в вертикальной плоскости компенсируется фокусировкой краевым полем поворотных магнитов [3]. Фокусирующие силы квадрупольного и краевого поля были настроены таким образом, что в обеих плоскостях, горизонтальной и вертикальной, наблюдаются устойчивые поперечные колебания пучка.

Каждый из четырех дипольных магнитов вывода при установке на соответствующую орбиту обеспечивают отклонение пучка в горизонтальной плоскости на 5° (рис. 1). Положение каждого магнита вдоль орбиты

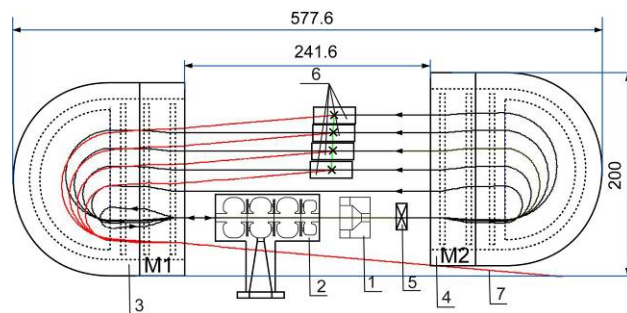


Рис. 1. Схема РМ: 1 — электронная пушка, 2 — линейный ускоритель, 3, 4 — поворотные магниты, 5 — квадрупольная линза, 6 — магниты вывода, 7 — общая траектория вывода из ускорителя

Таблица 1

Основные параметры компактного РМ

Параметр	Значение
Энергия инжекции пучка	25 кэВ
Энергии пучка	6, 8, 10, 12 МэВ
Равновесный прирост энергии	2 МэВ
Частота ВЧ поля	5712 МГц
Поле поворотных магнитов	0.8 Тл
Импульсный ток пучка на выходе из РМ	5 мА

выбирается таким образом, что отклоненный пучок пересекает предыдущую орбиту на краю основного полюса поворотного магнита. Магниты вывода сдвинуты

друг относительно друга по вертикали и закреплены в общем каркасе. Размещение определенного магнита вывода на соответствующей орбите достигается перемещением каркаса с помощью шагового двигателя, размещенного вне вакуумной камеры.

С увеличением энергии пучка расстояние между орбитами в РМ приближается к $d = \nu\lambda/\pi$, где ν — целое число, λ — длина волны СВЧ-поля линейного ускорителя. Для нашего РМ $\nu = 1$, $\lambda = 5.25$ см, поэтому $d = 1.67$ см. В силу малого расстояния между орбитами квадрупольная линза и магниты вывода должны иметь настолько большое отношение апертуры к внешним размерам, насколько это возможно. Так как кроме этого и линза, и магниты вывода должны находиться в вакууме, мы выбрали редкоземельный магнитный материал (РЗММ) в качестве источника магнитного поля этих элементов. Формирование полей квадрупольной линзы и магнитов вывода основано на принципах, изложенных в [4].

1. Квадрупольная линза

Согласно результатам моделирования динамики пучка в РМ, для того чтобы обеспечить устойчивые колебания пучка в горизонтальной плоскости, квадрупольная линза с эффективной длиной $L_{\text{eff}} = 2$ см должна иметь градиент поля G , равный 1–2 Тл/м. Схема линзы, спроектированной в соответствии с [4], показана на рис. 2.

Если апертура такой линзы много меньше ее длины, то градиент поля определяется по формуле $G = B_r \sin 2\Psi/2a$, где B_r — остаточная намагниченность РЗММ-блоков, а обозначения Ψ и a поясняются на рис. 2 [4]. Мы выбрали $a = 8$ мм и $\Psi = 15^\circ$, поэтому для достижения градиента $G = 1\text{--}2$ Тл/м необходимо, чтобы остаточная намагниченность блоков была равна $B_r = 30\text{--}60$ мТл. Из-за трудностей контроля столь малой остаточной намагниченности РЗММ-блоков мы увеличили значение B_r за счет уменьшения эффективной длины линзы. Длина РЗММ-блоков в этой связи была выбрана равной $l = 3$ мм (рис. 2) при величине апертуры $s = 16.6$ мм и ширине линзы $S = 21$ мм. Для защиты соседних орбит от рассеянного магнитного поля

квадрупольной линзы длина ярма линзы была выбрана равной $L = 20$ мм.

Для короткого квадруполя с эффективной длиной, меньшей радиуса ее апертуры, в любой плоскости, перпендикулярной к продольной оси z , включая $z = 0$, поперечные компоненты поля B_x и B_y проявляют сильную нелинейную зависимость от координат y и x соответственно. Фокусирующие свойства такой линзы могут быть определены произведением эффективной длины и эффективного градиента:

$$L_{\text{eff}}G_{\text{eff}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} B_y(x, y=0, z) dz}{x} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} B_x(x=0, y, z) dz}{y}.$$

Значение остаточной намагниченности, которое обеспечивает $L_{\text{eff}}G_{\text{eff}} = 0.02\text{--}0.04$ Тл, было определено моделированием с помощью программы ANSYS [3, 5], оно составило $B_r = 0.2\text{--}0.4$ Тл.

Конструкция квадрупольной линзы была спроектирована таким образом, что ее сборка была выполнена без использования клея и винтов, а только с применением специальных зажимов. SmCo был использован в качестве РЗММ для блоков линзы, которые показаны на рис. 3 слева. Блоки из SmCo намагничивались в нагретом состоянии в постоянном магнитном поле. После сборки квадрупольной линзы (изображена на рис. 3 справа) с помощью датчика Холла и специального измерительного стола [6] были измерены распределения магнитного поля в плоскостях xz и yz (рис. 4). Из распределения интеграла компоненты магнитного поля B_y ,

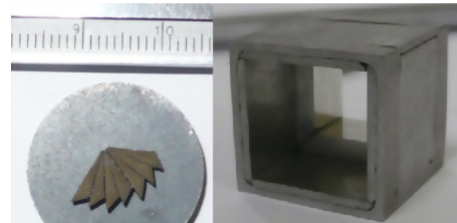


Рис. 3. Блоки из SmCo для квадрупольной линзы (слева) и собранная квадрупольная линза (справа)

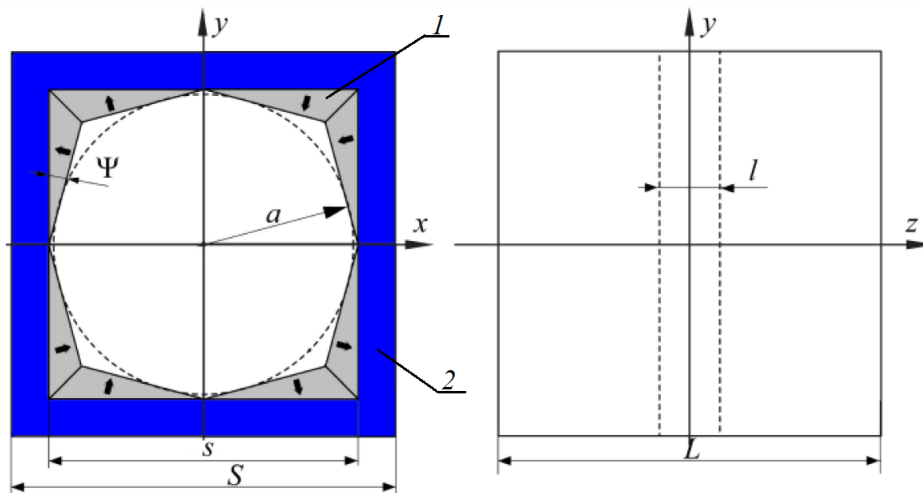


Рис. 2. Схема квадрупольной линзы: 1 — РЗММ-блоки, 2 — стальное ярмо, стрелками указано направление намагниченности РЗММ-блоков

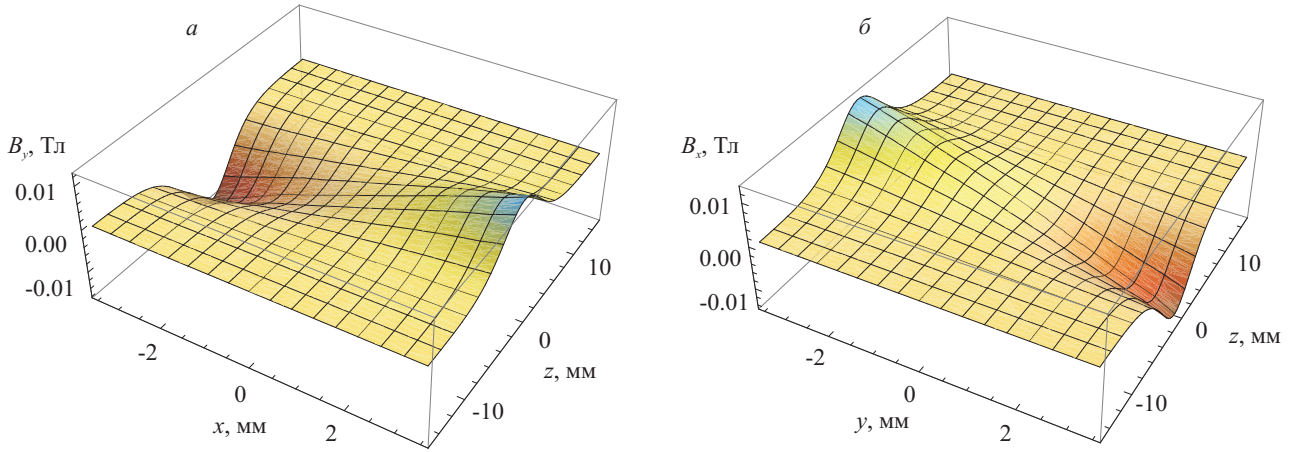


Рис. 4. Магнитные поля квадрупольной линзы в плоскостях xz и yz

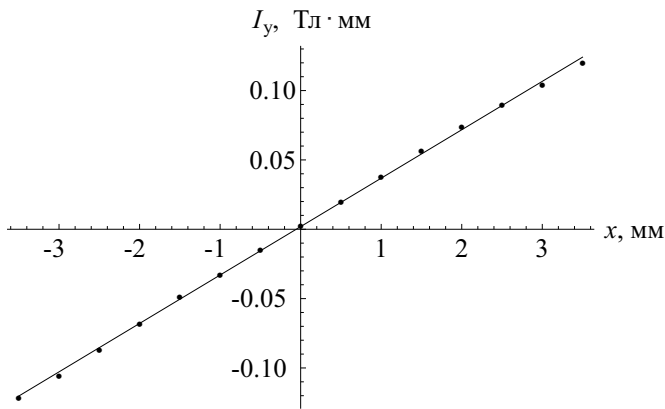


Рис. 5. Интеграл компоненты магнитного поля B_y как функция координаты x

$$I_y(x, y=0) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_y(x, y=0, z) dz,$$
 изображенного на рис. 5, следует, что $L_{\text{eff}}G_{\text{eff}}|_y = 0.0349$ Тл. Для x -компоненты $L_{\text{eff}}G_{\text{eff}}|_x = -0.0345$ Тл. Эти значения лежат

в диапазоне, обеспечивающем устойчивые поперечные колебания пучка в РМ.

2. Магниты вывода

Магниты вывода должны удовлетворять следующим основным требованиям: интегралы поля в горизонтальной плоскости должны принимать значения из табл. 2; интегралы поля в вертикальной плоскости должны быть близки к нулю; апертура магнитов должна быть не менее 8 мм в диаметре.

Таблица 2

Интегралы поля магнитов вывода

Орбита	Энергия, МэВ	$I_y _{\text{proj}}$, Тл·мм	$I_y _{\text{meas}}$, Тл·мм
3	6.009	1.89	1.89
4	8.036	2.47	2.49
5	10.048	3.05	3.08
6	12.055	3.63	3.66

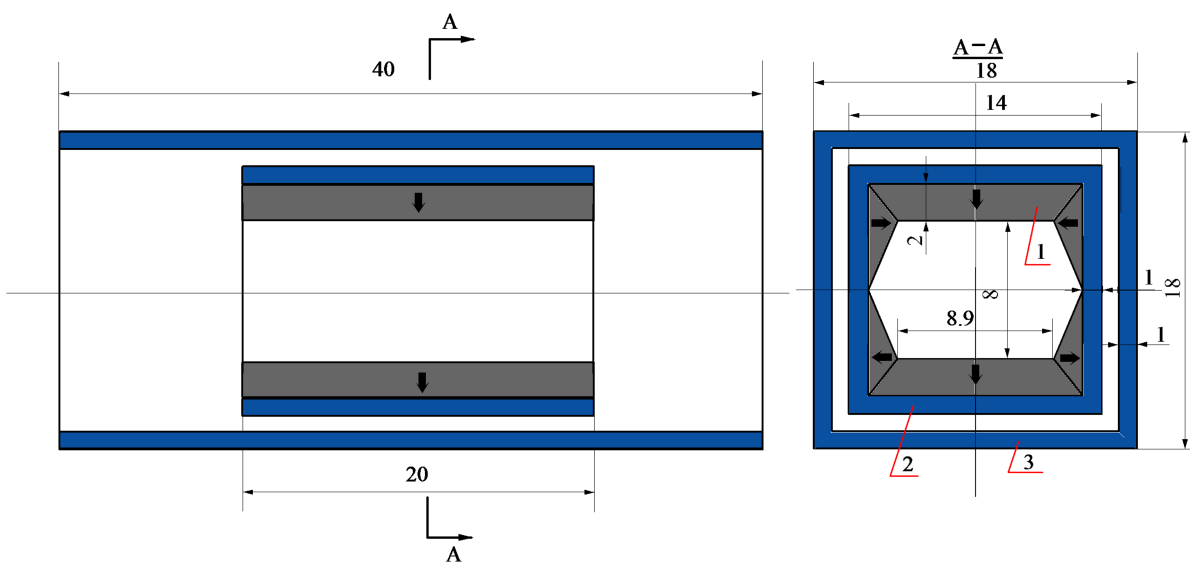


Рис. 6. Поперечное сечение магнита вывода: 1 — РЗММ-блоки, 2 — ярмо, 3 — магнитный экран. Размеры указаны в миллиметрах

Конструкция дипольного магнита, описанная в [4], требует специальной формы внутренней поверхности вертикальной стенки ярма, что приводит к значительной эффективной толщине ярма. Для наших магнитов вывода мы использовали упрощенную геометрию, показанную на рис. 6. В ней отклоняющее поле создается соответствующим образом намагниченными РЗММ-блоками, помещенными в верхней и нижней частях ярма. Чтобы улучшить однородность поля вдоль оси x , по бокам были размещены дополнительные РЗММ-блоки, форма и намагниченность которых были оптимизированы с помощью программы PANDIRA [7].

Все четыре магнита имеют одинаковую длину ярма и РЗММ-блоков, равную 20 мм. Требуемые значения интегралов полей магнитов достигаются соответствующим намагничиванием РЗММ-блоков. Чтобы избежать влияния рассеянных магнитных полей на соседние орбиты, каждый магнит вывода окружается магнитным экраном длиной 40 мм.

Как и в случае квадрупольной линзы, конструкция магнитов вывода позволяет проводить сборку магнитов без клея и винтов и только с помощью специальных зажимов и замков. Собранные магниты вывода показаны на рис. 7.



Рис. 7. Собранные магниты вывода

До сборки магнитов вывода их блоки из SmCo намагничивались в постоянном магнитном поле до проектных значений. После этого магниты собирались, измерялось распределение полей в плоскостях xz и yz , вычислялись интегралы отклоняющего поля

$$I_y(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_y(x, y=0, z) dz$$

и паразитного поля $I_x(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_x(x=0, y, z) dz$. Чтобы настроить вычисленные значения I_y для разных магнитов до проектных значений, приведенных в табл. 2, а также чтобы привести значения I_x как можно ближе к нулю, РЗММ-блоки магнитов перемагничивались.

На рис. 8 изображены распределения магнитного поля $B_y(x=0, y=0, z)$ вдоль оси z для всех четырех магнитов вывода. Хотя распределения полей неоднородны в центральной части магнитов вследствие неоднородности намагничивания РЗММ-блоков, это не имеет существенного значения для выводимого из РМ пучка.

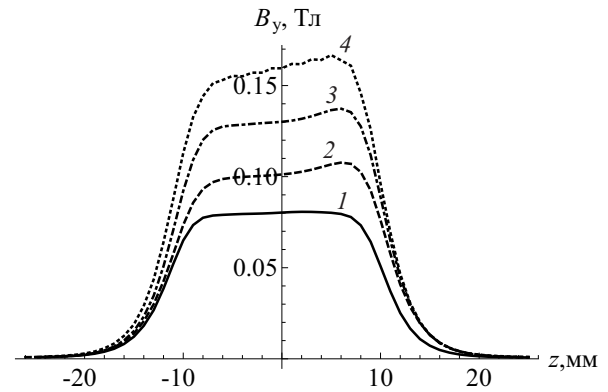


Рис. 8. Магнитное поле $B_y(x=0, y=0, z)$ четырех магнитов вывода: 1 — поле магнита вывода, расположенного на орбите с энергией 6 МэВ, 2 — с энергией 8 МэВ, 3 — с энергией 10 МэВ, 4 — с энергией 12 МэВ

Вычисленные на основании распределений, показанных на рис. 8, значения I_y указаны в последнем столбце табл. 2. Видно, что отличие между проектными и измеренными значениями интегралов поля составляет около 1%. Следовательно, ошибка угла отклонения выводимого пучка будет меньше 1 мрад. Вертикальное отклонение пучка из-за наличия паразитного поля B_x магнитов также меньше 1 мрад.

Заключение

Мы спроектировали, изготовили, собрали и настроили квадрупольный магнит и четыре дипольных магнита вывода, которые будут установлены в компактном 12 МэВ РМ. Анализ настроенных магнитных полей квадрупольного и магнитов вывода показал, что они могут быть использованы для ускорения пучка электронов в компактном РМ.

Список литературы

1. *Ishkhanov B.S., Pakhomov N.I., Shvedunov V.I. et al. // Proc. of RuPAC XIX. 2004. P. 474.*
2. *Kubyshin Yu.A., Berenguer J., Crisol A. et al. // Proc. of PAC09. 2009. P. 2775.*
3. *Rigla J.P. PhD Thesis. Universitat Politecnica de Catalunya, 2013.*
4. *Skachkov V.S. // Nucl. Inst. and Meth. A. 2003. 500. P. 43.*
5. *ANSYS Multiphysics. http://www.ansys.com.*
6. *Vladimirov I.Yu., Pakhomov N.I., Shvedunov V.I. et al. // Proc. of IPAC2014. 2014. P. 1277.*
7. *Halbach K., Holsinger R.F. // Particle Accelerators. 1976. 7. P. 213.*

The quadrupole lens and extraction magnets of a compact race-track microtron**I. Yu. Vladimirov^{1,a}, N. I. Pakhomov¹, V. I. Shvedunov^{1,b}, Yu. A. Kubyshin², J. P. Rigla³, V. V. Zakharov⁴**¹ *Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*² *Technical University of Catalonia. Barcelona 08028, Spain.*³ *I3M. Valencia 46022, Spain.*⁴ *Tehnomag ltd. Kaluga 248033, Russia.**E-mail: ^a timerke@mail.ru, ^b shved@depni.sinp.msu.ru.*

The compact race-track microtron (RTM) with a maximum energy of 12 MeV that is under construction at the Technical University of Catalonia consists of a quadrupole lens for horizontal focusing of the beam and four dipole magnets for the extraction of the beam from the accelerator. The source of the magnetic field in the magnets is a rare-earth permanent magnet (REPM). The main characteristics of the quadrupole lens and the extraction magnets and the procedure for the tuning of their magnetic fields are described.

Keywords: compact race-track microtron, quadrupole lens, dipole extraction magnet, magnetic field tuning.

PACS: 07.55.Db.

Received 4 August 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2014).

Сведения об авторах

1. Владимирив Иван Юрьевич — аспирант; e-mail: timerke@mail.ru.

2. Пахомов Николай Иванович — гл. инженер; тел.: (495) 939-24-51; e-mail: nipakhomov@mail.ru.

3. Шведунув Василий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-24-51; e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru.

4. Кубышин Юрий Александрович — доктор физ.-мат. наук; e-mail: iouri.koubychine@upc.edu.

5. Ригла Хуан Пабло — доктор философии; e-mail: jprigla@i3m.upv.es.

6. Захаров Виталий Владимирович — инженер-исследователь; e-mail: vitaliy.zakharov.83@gmail.com.