

10;12

Прецизионная магнитная квадрупольная линза для ядерного сканирующего микронзонда на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10

© В.А. Ребров,¹ А.Г. Пономарев,¹ Д.В. Магилин,¹ И.А. Белошапка,¹ А.Б. Дудник,¹ С.Н. Абрамович,²
Н.В. Завьялов,² А.Г. Звенигородский,² Е.В. Зимин²

¹ Институт прикладной физики НАН Украины,
40030 Сумы, Украина
e-mail: ipfmail@ipfcentr.sumy.ua

² Российский федеральный ядерный центр —
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
207190 Саров, Нижегородская область, Россия

(Поступило в Редакцию 14 июня 2006 г.)

Рассмотрены основные принципы, которые были использованы при разработке прецизионной магнитной квадрупольной линзы для ядерного сканирующего микронзонда с максимальным ускоряющим напряжением 14 MV. Было изготовлено четыре магнитных квадрупольных линзы, объединенных в дублеты. Дублеты расположены на юстировочных механизмах, позволяющих совмещать локальную систему координат каждой линзы с лабораторной системой, связанной с осью пучка. Каждая линза имеет максимальный градиент поля 0.68 T/cm, обеспечивающий стигматическую фокусировку пучка с рабочим расстоянием 22 см. Все линзы имеют неразборную конструкцию и выполнены из одного куска высококачественной электротехнической стали. Для запитывания линз разработана система питания, обеспечивающая ручное и дистанционное управление возбуждением полюсных наконечников.

PACS: 07.55.Db, 41.85.Lc

Введение

Магнитные квадрупольные линзы, применяющиеся при формировании ионного зонда микронных и субмикронных размеров при энергии частиц пучка ~ 10 MeV, имеют ряд отличительных особенностей по сравнению с квадрупольными магнитами, которые широко используются в транспортировке пучков заряженных частиц высоких энергий. Максимальные поперечные размеры пучка здесь составляют около 1 mm, пучок хорошо сформирован на входе в зондоформирующую систему при помощи системы коллиматоров, поэтому можно применять линзы с малой апертурой. Стремление уменьшить радиус апертуры магнитной квадрупольной линзы объясняется необходимостью получить высокий градиент поля, так как короткофокусные системы обладают большей разрешающей способностью и увеличение оптической силы линз должно происходить в первую очередь за счет увеличения градиента, а не за счет увеличения длины линзы. Однако уменьшение радиуса апертуры накладывает определенные требования на точность позиционирования полюсных наконечников как жесткого целого с целью соблюдения квадрупольной симметрии.

Проведенные расчеты [1] показывают, что уже при радиусе апертуры около 4 mm точность позиционирования полюсных наконечников должна быть $< 4 \mu\text{m}$, в противном случае появление паразитных мультипольных компонент поля приводит к значительному снижению пространственного разрешения микронзонда [2]. Поэтому

при изготовлении магнитопроводов линз необходимо учитывать имеющееся технологическое оборудование, способное обеспечить нужную точность. Немаловажным фактором является выбор материала магнитопровода, который должен иметь, с одной стороны, минимальную коэрцитивную силу, а с другой — высокое значение магнитного насыщения материала. Все эти принципы были заложены в основу разработанных прецизионных магнитных квадрупольных линз для формирования микронзонда на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10 ВНИИЭФ.

Прецизионная магнитная квадрупольная линза

В большинстве современных ядерных микронзондов с энергией пучка ионов в несколько мегаэлектронвольт основными фокусирующими элементами являются прецизионные магнитные квадрупольные линзы. Поэтому при создании ядерного сканирующего микронзонда магнитным квадруполям уделяется особое внимание. Наилучшее пространственное разрешение микронзонда получено для линз, у которых магнитопровод неразборный, изготовленный из одного куска высококачественной электротехнической стали с применением электроэрозионной обработки металла [3,4]. Это приводит к уменьшению паразитных мультипольных компонент поля линз до уровня, когда их вклад в увеличение пятна на мишени через паразитные аберрации 2-го и 3-го порядков незна-

чителен по сравнению с собственными абберациями 3-го порядка самих линз. При этом необходимо обеспечить высокий градиент поля в области прохождения пучка, а источник питания токовых катушек линз должен иметь стабильность тока на уровне 10^{-5} .

В рамках проекта по созданию ядерного сканирующего микронзонда на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10 с энергией пучка протонов до 14 MeV были выполнены работы по оптимизации зондоформирующей системы и выбраны основные параметры магнитных квадрупольных линз [5]. При разработке линз был учтен опыт, накопленный в мировой практике [3,4,6]. Для максимального использования всех параметров применяемой электротехнической стали была проведена оптимизация формы полюсов линзы. Цель оптимизации состояла в нахождении такого профиля наконечников, при котором однородность максимального градиента в области прохождения пучка была бы не хуже 10^{-4} , одновременно напряженность магнитного поля на их поверхности находилась бы в линейной области кривой намагничивания выбранного материала. Последнее позволяет избежать локального магнитного насыщения материала полюсов и возникновения паразитных мультипольных компонент поля.

По результатам расчетов были выбраны полюсные наконечники в виде стержней прямоугольного сечения, торцы которых имеют форму цилиндрической поверхности с гиперболической образующей. Чтобы избежать магнитного насыщения материала, возникающего локально в области наименьшего расстояния между соседними полюсами при повышении до определенного предела напряженности магнитного поля, гиперболическая образующая и боковая поверхность сопрягались при помощи окружности. Параметрами оптимизации являлись ширина полюсов и радиус сопряжения гиперболической образующей с прямолинейной боковой ее частью.

Выбранный профиль полюсных наконечников магнитной квадрупольной линзы явился компромиссом между стремлением получить поле с минимальными паразитными составляющими и максимальным градиентом. В качестве материала магнитопровода была взята магнитомягкая электротехническая сталь Э-III (изготовитель ОАО „Днепроспецсталь“). С учетом результатов работ [1,5] были определены следующие параметры линзы: ярмо магнитопровода имеет форму цилиндра $\varnothing 235$ мм, длина образующей 90 мм и 115 мм; радиус апертуры 6.5 мм. Была применена конструкция линзы, ярмо и полюсные наконечники которой выполнены из единого, цельного куска металла. Требуемая точность расположения полюсов как жесткого целого $\pm 5 \mu\text{m}$ и чистота поверхности $0.63 \mu\text{m}$ при изготовлении магнитопровода достигается использованием высокоточного электроэрозионного оборудования. В технологию изготовления магнитопровода включен отжиг в вакуумной печи при $T = 880^\circ\text{C}$ в течение 5 h для снятия внутренних напряжений металла после токарной и предварительной электроэрозионной обработки заготовок. Таким образом

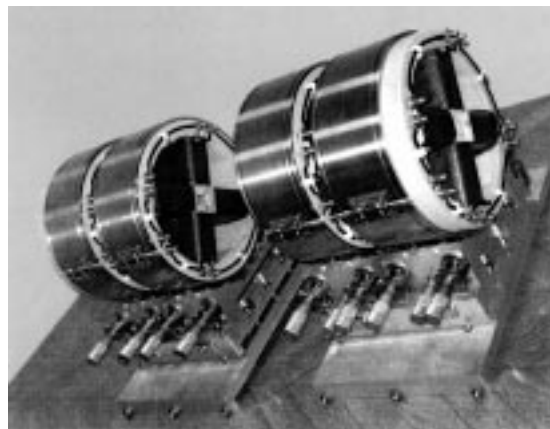


Рис. 1. Два дублета прецизионных магнитных квадрупольных линз, установленных на механизмы пространственного позиционирования.

обеспечивается магнитная однородность и достигается полная внутренняя разгрузка структуры металла. На каждый полюс линзы установлена катушка возбуждения, которая имеет 90 витков медного провода сечением $1.0 \times 4.25 \text{ mm}^2$, уложенных в шесть слоев.

Было изготовлено четыре магнитные квадрупольные линзы, которые объединены в два дублета. На рис. 1 приведены два дублета магнитных квадрупольных линз, установленных на специальных юстировочных механизмах, которые обеспечивают возможность совмещения локальной системы координат каждой из линз с лабораторной системой, привязанной к оси пучка с точностью $\pm 5 \mu\text{m}$. Испытания линз проводились на стенде по методике восстановления поля, описанной в работе [7]. Испытания показали, что во всех линзах наличие паразитных секступольных и октупольных компонент относительно основной квадрупольной компоненты поля не превышает 0.003 cm^{-1} и 0.005 cm^{-2} соответственно. Величина градиента 0.68 T/cm достигается при токе в катушках линзы 15 А.

Система питания линз

При проектировании источника питания учитывался тот факт, что, согласно расчетам, для обеспечения градиента магнитного поля $\approx 0.7 \text{ T/cm}$ необходимо, чтобы магнитодвижущая сила, создаваемая обмотками в сердечниках линзы, составляла $1350 \text{ A} \cdot \text{t}$. Технологически более просто изготовить обмотки с малым количеством (≈ 10) витков, однако в этом случае источник тока должен развивать ток в обмотках $\approx 135 \text{ A}$. Учитывая, что стабильность тока должна быть на уровне 10^{-5} , стоимость такого источника тока будет достаточно высокой. Поэтому при проектировании обмоток количество витков для одного сердечника линзы было принято 90. Реализовать для такого количества витков источник тока с выходным током 15 А достаточно просто с

применением недорогой элементной базы. Для намотки катушек применен провод с площадью сечения 4.25 mm^2 . При токе обмоток с таким проводом, равным 12 А, длительное нагревание катушек линзы при комнатной температуре составило не более 40°C , что вполне допустимо, при этом не требуется принудительное воздушное охлаждение.

Изготовленная система питания линз (рис. 2) позволяет подключить две пары квадрупольных линз, включенных последовательно, и имеет следующие параметры:

- диапазон регулирования тока линз от 0.2 до 15 А при активном сопротивлении до 0.5Ω ;

- минимальная дискрета перестройки тока 0.6 мА;

- долговременная нестабильность установленного тока 0.003%;

- питание от сети переменного напряжения $50 \text{ Hz} - 220 \text{ V} + 10 - 15\%$;

- диапазон рабочих температур $10 - 35^\circ\text{C}$;

- максимальная потребляемая мощность 120 Вт;

- охлаждение блока питания — воздушное блоком вентиляторов.

Управление блоком питания и контроль тока в линзах выполняется контроллером. Схема блока питания линзы приведена на рис. 3.

Сетевое напряжение понижается трансформатором T_1 , выпрямляется диодным мостом VD_1 и через схему зарядки конденсатора заряжает конденсатор C_1 . Схема зарядки конденсатора служит для ограничения зарядного тока конденсатора, возникающего при включении питания. После зарядки конденсатора контроллер отключает ограничитель тока.

Транзисторы VT_1, VT_2 (типа 2Т827А) являются источником тока. Резисторы R_1, R_2 совместно со схемой управления и выравнивания токов служат для выравнивания токов в транзисторах. Шунт R_3 является датчиком тока, протекающего в нагрузке L .

Схема измерения тока (измерительный усилитель на базе операционных усилителей К140УД17) усиливает напряжение, возникающее на датчике тока. С выхода схемы измерения тока напряжение подается на ин-



Рис. 2. Система питания прецизионных магнитных квадрупольных линз.

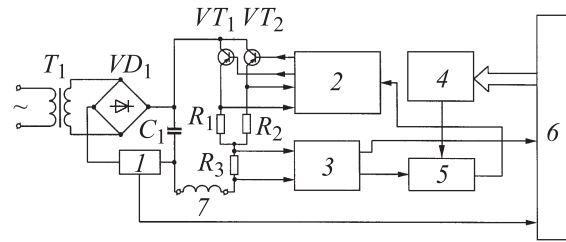


Рис. 3. Блок-схема блока питания магнитных квадрупольных линз. 1 — схема зарядки конденсатора; 2 — схема управления и измерения токов; 3 — схема измерения тока; 4 — ЦАП; 5 — усилитель рассогласования; 6 — контроллер; 7 — нагрузка.

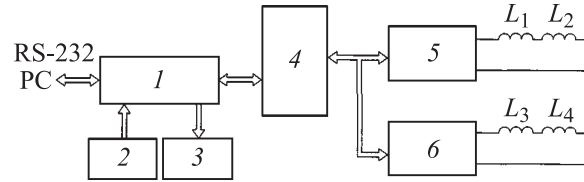


Рис. 4. Блок-схема системы питания магнитных квадрупольных линз. 1 — контроллер; 2 — клавиатура; 3 — дисплей; 4 — блок согласования; 5, 6 — блок питания линзы.

вертирующий вход усилителя рассогласования, образуя отрицательную обратную связь по току. Также это напряжение подается на аналоговый вход контроллера для контроля значения тока линзы.

На неинвертирующий вход усилителя рассогласования подается напряжение с выхода прецизионного 16-разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) типа AD421BN. Контроллер загружает ЦАП двоичным кодом, соответствующим задаваемому току линзы. Напряжение, вырабатываемое усилителем рассогласования (операционный усилитель К140УД17), управляет транзисторами VT_1, VT_2 и задает ток в нагрузке.

Блок питания входит в состав системы питания линз. Система питания линз выполняет управление и контроль тока двух пар линз, входящих в состав микронзонда. Блок-схема системы приведена на рис. 4.

В систему входят два блока питания линз. К выходу каждого из блоков питания последовательно подключены две линзы. Установку и контроль тока линз выполняет контроллер через блок сопряжения. К контроллеру подключены клавиатура (6 клавиш) и жидкокристаллический индикатор для обеспечения управления и контроля тока в ручном режиме. Также контроллер имеет возможность подключения к локальной вычислительной сети по последовательному интерфейсу RS-232C для дистанционного управления блоками питания.

Заключение

Разработана прецизионная магнитная квадрупольная линза для ядерного сканирующего микронзонда на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭП-10

ВНИИЭФ. Всего было изготовлено четыре линзы с двумя различными длинами 90 mm и 115 mm. Радиус апертуры каждой из линз 0.65 cm. Катушки имеют 90 витков медного провода сечением 4.25 mm². Максимальный градиент поля 0.65 T/cm достигается при токе 15 A. Проведены испытания линз с целью определения качества структуры поля, которые показали, что величина относительных (к основной квадрупольной компоненте) паразитных секступольной и октупольной составляющих не превышают 0.003 cm⁻¹ и 0.005 cm⁻² соответственно. Также изготовлена система питания линз, которая обеспечивает ручное и дистанционное управление возбуждением полюсных наконечников с точностью 0.003% по величине тока. Механизмы позиционирования каждой из линз являются автономными и позволяют совмещать локальную систему координат линз с лабораторной системой, связанной с осью пучка с точностью 5 μm.

Список литературы

- [1] *Melnik K.I., Ponomarev A.G.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2003. Т. 3. № 4. С. 301–304.
- [2] *Ponomarev A.G., Melnik K.I., Miroshnichenko V.I. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. 2003. В. 201. P. 637–644.
- [3] *Szymanski R., Jamieson D.N., Rout B., Brenn R.* // Nucl. Instr. and Meth. 2005. В. 231. P. 49–52.
- [4] *Breese M.B.H., Grime G.W., Linford W., Harold M.* // Nucl. Instr. and Meth. 1999. В. 158. P. 48–52.
- [5] *Абрамович С.Н., Завьялов Н.В., Звенигородский А.Г.* и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 6–12.
- [6] *Bogatov N., Bondarchuk E., Doinikov N. et al.* // Proc. of the 6th Europ. Particle Accelerator Conf. (EPAC-98). Stockholm, 22–26 June, 1998. P. 1963–1965.
- [7] *Lebed S., Ponomarev A.* // Nucl. Instr. and Meth. 1997. В. 130. P. 90–96.