

10;12

## Блочная система сканирования пучком протонов в ядерном микрозонде

© Н.А. Сайко,<sup>1</sup> А.Г. Пономарев,<sup>1</sup> С.Н. Мордик,<sup>1</sup> В.М. Еременко,<sup>1</sup> И.Н. Лифар,<sup>1</sup> А.И. Михайличенко,<sup>1</sup> С.Н. Абрамович,<sup>2</sup> Ю.И. Виноградов,<sup>2</sup> А.Г. Звенигородский,<sup>2</sup> Е.В. Зимин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики НАН Украины,  
40030 Сумы, Украина

e-mail: ipfmail@ipfcentr.sumy.ua

<sup>2</sup> Институт ядерной и радиационной физики, Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
207190 Саров, Нижегородская область, Россия

(Поступило в Редакцию 14 июня 2006 г.)

Описаны общие принципы построения блочной системы сканирования пучком протонов в ядерном микрозонде, состоящей из ферромагнитной двухкоординатной сканирующей системы и динамического источника питания. Система обеспечивает величину прямоугольного раstra сканирования пучком ионов  $H^+$  с энергией 14 MeV размерами не менее  $\pm 300 \mu m$  на мишени и минимальный период перехода от точки к точке 200  $\mu s$ . Время позиционирования не превышает 40  $\mu s$ .

PACS: 07.79.-v

### Введение

Ядерный сканирующий микрозонд (ЯСМЗ) представляет собой ионооптическую систему, состоящую из объектного и углового коллиматоров, фокусирующей системы, сканирующей системы и камеры взаимодействия пучка ионов с исследуемым образцом. Камера взаимодействия оснащена набором детектирующих устройств, необходимых для регистрации вторичных эффектов взаимодействия ионов сфокусированного пучка с атомами исследуемого образца. Общее описание ядерного сканирующего микрозонда можно найти в работах [1,2]. Особенностью ЯСМЗ при регистрации продуктов взаимодействия ионов с мишенью является синхронизация процессов сканирования и сбора данных с привязкой получаемых данных к геометрическому положению пятна пучка на мишени, что позволяет определять не только элементный состав образца, но и его распределение по образцу с разрешением до нескольких сот нанометров. В связи с тем, что пучок ионов обладает высокой энергией на уровне нескольких MeV и плотностью тока  $\sim 1 \text{ nA}/\mu m^2$ , сканирующей системе и системе сбора данных уделяется особое внимание. В первую очередь это вызвано требованиями неразрушающего анализа, с одной стороны, и необходимостью нахождения пятна пучка в точке в течение времени, которое обеспечит необходимое количество спектрометрической информации для анализа, с другой. При этом система сбора должна всю получаемую информацию обрабатывать и фиксировать на внешних носителях. Кроме обеспечения высоких динамических характеристик сканирующая система не должна искажать размеры пучка во всем растре сканирования.

На основании вышесказанного можно привести основные требования к системе сканирования:

- обеспечение необходимой разрешающей способности;
- линейность раstra;
- возможность получения нужного закона движения пучка по поверхности;
- обеспечение повторяемости оптических параметров пучка;
- обеспечение эффективности сбора данных (малое собственное „мертвое время“);
- высокая скорость сканирования (до 5 kHz).

Сканирующие системы (СС) различают по месту их расположения вдоль оптического тракта как послелинзовые, предлинзовые и внутрилинзовые. Преимущество послелинзовых сканирующих систем заключается в том, что они практически не влияют на размер пучка на мишени во всем растре сканирования. Однако для таких СС накладываются жесткие ограничения на их продольные (вдоль оптической оси пучка) размеры — для оптических систем с коэффициентами уменьшения  $D \approx 100$  характерны рабочие расстояния до 20 см. В результате этого для обеспечения размера кадра сканирования на уровне  $1 \times 1 \text{ mm}$  для протонного пучка с энергией в несколько MeV на таком расстоянии требуются сильные магнитные или электрические поля. Напротив, для предлинзовых и внутрилинзовых сканирующих систем нет таких жестких ограничений на продольные размеры. Однако такие системы отклоняют пучок от оси до входа в фокусирующие элементы и в результате aberrаций приводят к значительному увеличению размеров пучка на краях раstra и снижению пространственного разрешения.

В ЯСМЗ находят применение электростатические [3] и ферромагнитные СС (ФМСС) [4]. Преимущество фер-

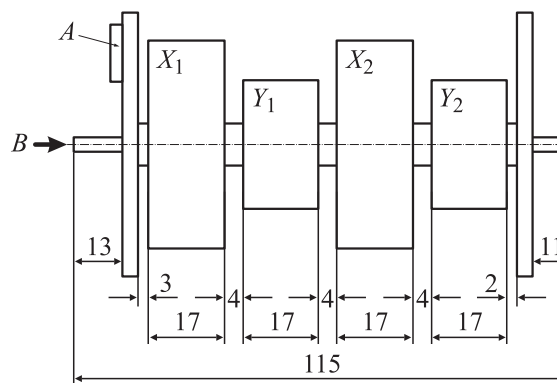
ромагнитных СС заключается в хорошей концентрации отклоняющего поля. При малых линейных продольных размерах в зависимости от конструкции ФМСС может располагаться после последней линзы фокусирующей системы без значительного увеличения рабочего расстояния. К недостаткам следует отнести нарушение повторяемости ионно-оптических параметров пучка при больших отклонениях от оптической оси системы, что вызывается нестабильностью коэффициента магнитной проницаемости и наличием коэрцитивной силы, присущей ферромагнетикам. Кроме того, несогласованность типа феррита с максимальной частотой сканирования приводит к значительному выделению тепла и нарушению физических параметров сканирующей системы. Поэтому к выбору ферритов необходимо относиться с особой тщательностью. Стоит также обратить внимание на то, что ферритовые сердечники  $U$ -образной формы имеют существенные недостатки, связанные с неоднородностью поля в плоскости сканирования и достаточно большой областью краевого поля. Однако такой тип СС позволяет обеспечить достаточно большие значения магнитной индукции [4]. В работе [5] был предложен активный элемент ФМСС с неявно выраженными полюсными наконечниками с улучшенной однородностью и незначительной областью краевого поля. Результаты применения сканирующей системы на базе такого активного элемента приведены в работе [6].

В связи с ограниченной электрической прочностью в электростатических сканирующих системах для отклонения пучков ионов MeV энергий необходимо иметь достаточно протяженную СС, что затрудняет ее использование в послелинзовых системах с коротким рабочим расстоянием. Одним из основных преимуществ таких систем является хорошая повторяемость ионно-оптических параметров пучка и высокая скорость сканирования.

Для питания ФМСС обычно используется серийно выпускаемый программируемый источник тока. Основным недостатком такого решения является большое время установления тока в СС и отсутствие аппаратной поддержки синхронизации системы сбора данных, что затрудняет синхронизацию системы в целом и достижение высокой скорости сканирования (до нескольких миллисекунд). Поэтому возникает необходимость в разработке специализированного источника питания сканирующей системы, оптимальным образом согласованного с ее параметрами.

## Сканирующая система

Ранее в ИПФ НАНУ был разработан компактный активный отклоняющий ферромагнитный элемент с неявно выраженными полюсными наконечниками и улучшенной однородностью поля [5]. Его отличительной особенностью является цилиндрическая форма зазора, позволяющая достигать более высокой однородности поля



**Рис. 1.** Схематическое изображение конструкции сканирующей системы (все размеры даны в мм);  $A$  — подсоединение питания катушек,  $B$  — вход пучка,  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$  — катушки, осуществляющие отклонение пучка в  $x$  и  $y$  поперечных к пучку направлениях соответственно.

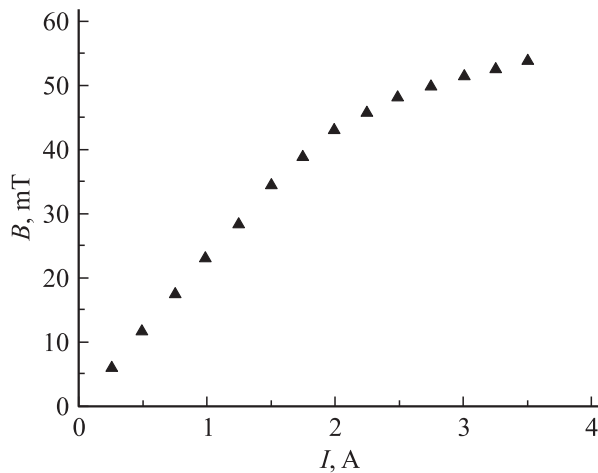
и обеспечивающая меньшие боковые рассеянные поля, чем в случае использования традиционной  $U$ -образной формы полюсных наконечников [4]. В рамках проекта по созданию ЯСМЗ на базе перезарядного электростатического ускорителя ЭПП-10 ВНИИЭФ [7] нами была разработана послелинзовая блочная ферромагнитная двухкоординатная сканирующая система, использующая этот активный элемент. Она представляет собой четыре чередующиеся пары отклоняющих элементов (по две в каждом направлении сканирования) (рис. 1). Использование такой чередующейся структуры вызвано требованием обеспечения раstra сканирования приблизительно одинакового размера по обоим направлениям при одинаковых режимах питания.

Магнитопроводы отклоняющих катушек, выполненные из феррита M1000HM1  $K65 \times 40 \times 9$ , предварительно отбирались по значению магнитной проницаемости с разбросом в пределах  $\pm 5\%$  для каждой четверки ферритовых колец, необходимых для изготовления магнитопровода одной отклоняющей катушки. Выбор типа феррита обусловлен максимальной частотой сканирования 5 kHz. Применение ферритов, не согласованных по частоте с частотой сканирования, приводит к большому выделению тепла, нагреву катушки и, как следствие, к изменению характеристик ферромагнитного активного элемента в процессе эксперимента, что недопустимо. Для уменьшения вихревых токов и соответственно энергетических потерь на высокой скорости сканирования проводилось попарное склеивание колец в составе магнитопровода. Был рассчитан рабочий режим запитывания катушек исходя из энергии протонов и требуемого раstra сканирования. Для этого были проведены измерения зависимости величины магнитной индукции в рабочей области от тока в катушке (рис. 2) с целью определения линейной области. Следует отметить, что для достижения линейности раstra на уровне 1% необходимо применять специальные средства

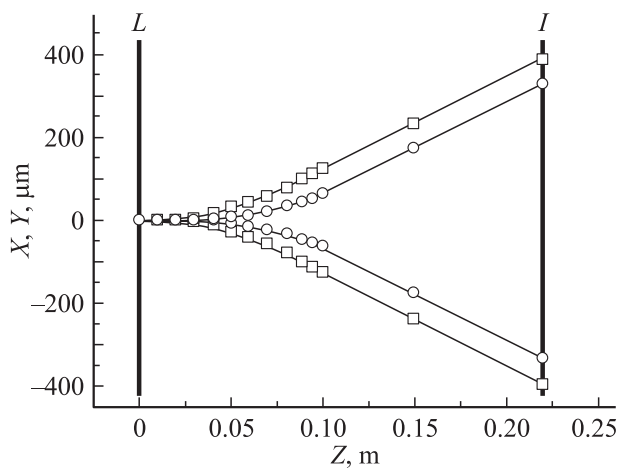
преобразования нелинейной кривой намагничивания в линейное измерение напряженности поля. На основании измерений продольного распределения поля были рассчитаны режимы питания сканирующей системы. Численное моделирование движения пучка было выполнено с применением метода, изложенного в работе [8].

Результаты расчетов и измерений показывают, что при двуполярном включении отклоняющих катушек при токе  $\pm 2$  А обеспечивается растр сканирования протонного пучка с энергией 14 МэВ не менее  $\pm 300 \mu\text{m}$  (рис. 3). На рис. 4 представлен график зависимости отклонения протонного пучка на мишени микронметра от энергии.

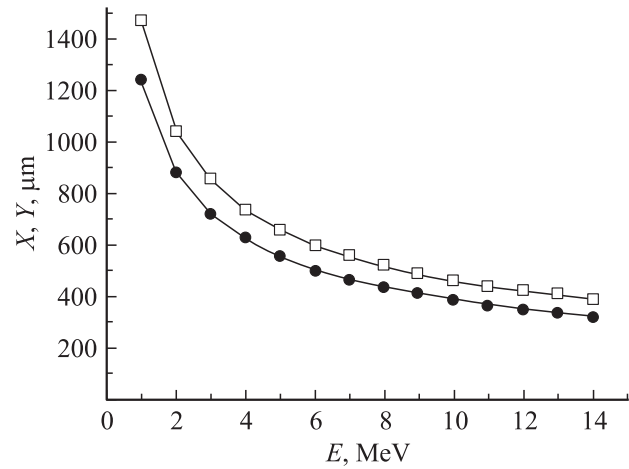
Для обеспечения линейности растра важно было выполнить точное позиционирование плоскостей отклонения пучка сканирующей системы относительно горизон-



**Рис. 2.** Зависимость величины магнитной индукции  $B$  в области прохождения пучка в середине ферритового сердечника от тока в катушках  $I$  для используемых ферритов в сканирующей системе.



**Рис. 3.** Величина растра сканирования в зависимости от рабочего расстояния для протонного пучка с энергией 14 МэВ;  $L$  — плоскость окончания области эффективного поля последней линзы в фокусирующей системе,  $I$  — плоскость поверхности мишени ( $\square$  —  $X$ ;  $\circ$  —  $Y$ ).



**Рис. 4.** Зависимость величины растра сканирования протонного пучка на мишени от энергии для рабочего состояния  $g = 22$  см ( $\square$  —  $X$ ;  $\bullet$  —  $Y$ ).



**Рис. 5.** Общий вид блочной сканирующей системы без корпуса.

тальной плоскости основания камеры взаимодействия пучка с образцом. С целью уменьшения влияния материала ионопровода на структуру и скорость изменения поля в рабочей области при ступенчатом изменении токов в отклоняющих катушках трубка ионопровода диаметром 6,4 мм была изготовлена из титана. С двух сторон трубки имеются вакуумные уплотнения. Остальные детали и узлы сканирующей системы находятся при нормальном атмосферном давлении. Общий вид сканирующей системы без корпуса представлен на рис. 5.

## Динамический источник питания

Для управления процессом сканирования был разработан источник питания с высокими динамическими параметрами, обладающий нагрузочными характеристиками, максимально согласованными со сканирующей системой. В его задачи также входит динамическая аппаратная поддержка синхронизации системы сбора

данных относительно текущего геометрического положения пучка на мишени. Сканирование мишени осуществляется таким образом, что система сбора данных блокируется на время позиционирования при прямом ходе пучка. Обратный ход пучка производится максимально быстро, и на это время также блокируется система сбора данных. Тем самым устраняется влияние явления гистерезиса в ферромагнетике на геометрическое разрешение. Сбор данных осуществляется в режиме „event by event“, и каждое событие, поступающее из регистрирующей аппаратуры, маркировано текущим геометрическим положением.

Источник питания совмещает в себе два канала для электрического питания двухкоординатной сканирующей системы и обеспечивает ступенчатое изменение тока в сканирующей системе в диапазоне от 0 до 2.047 А с минимальным шагом 2 мА, что позволяет обеспечивать величину раstra сканирования для пучка протонов с энергией 14 MeV не менее  $\pm 300 \mu\text{m}$  при рабочем расстоянии ионно-оптической системы 22 см. Геометрическое разрешение достигает 1024 рсх в каждом направлении для каждого из каналов. Частота сканирования может достигать 5 kHz. При этом время позиционирования не превышает 40  $\mu\text{s}$ .

Критерием для определения момента перехода от точки к точке могут служить:

- абсолютное время нахождения в точке;
- „живое“ время (за вычетом времени позиционирования) нахождения в точке;
- набор определенного заряда с интегратора тока (имеется вход для интегратора тока);
- набор определенного значения счетной информации с детектора вторичных электронов (имеется соответствующий логический вход).

Глубина регистров, накапливающих данные о времени, заряде и информации с детектора вторичных электронов, составляет  $2^{32}$  значения. Вся эта информация для каждой точки сканирования поступает на управляющий компьютер.

## Заключение

В процессе создания ядерного сканирующего микронзонда на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10 ВНИИЭФ на энергию до 14 MeV разработана послелинзовая блочная ферромагнитная сканирующая система со специализированным источником питания. Расчеты на основе измерений поля в области прохождения пучка показывают, что величина прямоугольного раstra сканирования обеспечивается не менее  $\pm 300 \mu\text{m}$  для протонного пучка с энергией 14 MeV при рабочем расстоянии 22 см. Минимальное время перехода пучка от точки к точке составляет 200  $\mu\text{s}$ . „Мертвое“ время не превышает 40  $\mu\text{s}$ , геометрическое разрешение в каждом поперечном направлении — 1024 рсх. Источник питания, максимально согласованный по параметрам со

сканирующей системой, обеспечивает синхронизацию сбора данных и имеет широкие возможности по заданию критерия перехода пучка от точки к точке.

## Список литературы

- [1] Maggiore C.J. // Scanning Electron Microscopy. 1980. Vol. 1. P. 439–454.
- [2] Мордик С.Н., Пономарев А.Г., Сторижко В.Е., Сулкио-Клефф Б. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2002. Вып. 1/2. С. 239–244.
- [3] Ryan C.G., Jamieson D.N., Griffin W.L. and Cripps G. // Nucl. Instr. and Meth. 1999. В. 158. P. 18–23.
- [4] Shariff A., Nilsson C., Auzelyte V. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 2005. В. 231. P. 7–13.
- [5] Khomenko V., Lebed S., Mordik S. // Nucl. Instr. and Meth. 1997. В. 130. P. 86–89.
- [6] Lebed S., Stachura Z., Cholewa M. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 2001. В. 181. P. 95–98.
- [7] Абрамович С.Н., Завьялов Н.В., Звенигородский А.Г. и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 6–12.
- [8] Мордик С.Н., Пономарев А.Г. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 7. С. 98–105.