

## НОВАЯ КОРОТКАЯ ЗОНДОФОРМИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЯДЕРНОГО НАНОЗОНДА

С. А. Лебедь

*Институт прикладной физики, Сумы*

Описана оптимизированная короткая (полная длина 2,25 м) зондоформирующая система, использующая разделенный «русский» квадруплет магнитных квадрупольных линз для фокусировки пучка протонов с энергией 3 МэВ. Система позволяет сформировать на мишени зонда пучок ионов с размерами пятна  $< 1$  мкм в сильноточной моде с помощью линз, имеющих значительное (0,3 – 1 %) содержание паразитических (секступольных и октупольных) компонент в поле их полюсных наконечников. В оптимизационных расчетах учитывались доминирующие внутренние и паразитические линзовые aberrации. Показаны достоинства и недостатки альтернативных зондоформирующих систем. Полученные результаты численного моделирования планируется использовать при проектировании вертикального ядерного нанозонда с внешним пучком ионов.

### 1. Введение

Основными компонентами сканирующего ядерного микро/нанозонда являются: электростатический ускоритель ионов (ядер) водорода (или гелия) типа Ван де Граафф или тандем до энергий  $\sim 1 - 10$  МэВ и зондоформирующая система (ЗФС). В большинстве из действующих зондов в ЗФС используется квадруплет или триплет прецизионных магнитных квадрупольных линз с очень низким содержанием паразитических компонент (до 0,05 %) в поле их полюсных наконечников [1 - 5]. Цена одной такой линзы превышает 10 тыс. долл. США. Даже будучи столь дорогостоящим, этот подход не гарантирует достижение субмикронного пространственного разрешения зонда в сильноточной моде (при токе пучка ионов  $\geq 100$  пкА). Только несколькими ведущими лабораториями мира удалось преодолеть одномикронный барьер с помощью таких линз [1]. Отметим, что сильноточная мода предназначена для основных ядерно-физических методик: характеристического рентгеновского излучения (PIXE), спектроскопии обратного и прямого резерфордского рассеяния (RBS и FRS), анализа ядерных реакций (NRA), каналирования [5].

Как было показано в [6, 7], короткая (полная длина  $l < 2,5$  м) оптимизированная ЗФС, основанная на разделенном «русском» квадруплете магнитных квадрупольных линз (далее – короткая ЗФС), позволяет обеспечить современный ядерный микрозонд достаточно высоким пространственным разрешением (1,2 – 2 мкм) в сильноточной моде. При этом могут быть использованы значительно более дешевые линзы с высоким содержанием паразитических aberrаций (0,5 – 1 %).

Цель данной работы – продемонстрировать потенциальную способность новой короткой ЗФС обеспечивать субмикронное пространственное разрешение в сильноточной моде с помощью вышеупомянутых недорогих квадрупольных линз.

### 2. Постановка задачи

Заданными параметрами в задаче также являются (табл. 1): размеры линз; расстояние ( $s$ ) между первой и второй, третьей и четвертой линзами; рабочее расстояние ( $g$ ) ЗФС; яркость ( $b$ ) пучка ионов (в данной работе – протонов); эмиттанс ( $E$ ) микропучка на входе в ЗФС; энергия ( $W$ ) протонов и их разброс ( $\delta$ ) в пучке по импульсам.

Настоящая статья посвящена второму оптимизационному подходу к ЗФС [6 - 8]. Оптимизировать ЗФС означает минимизировать размер пятна от пучка протонов на мишени (пространственное разрешение зонда) при заданной величине его тока:  $I = E \cdot b \cdot W$ . Величина  $E$  определяется размерами объектной и угловой щелей системы. Оптимизация

Таблица 1. Физические параметры двух коротких расчетных и четырех действующих ЗФС

Параметры	Короткая, квадруплет (Новая)	Короткая, квадруплет (Лейпциг)	Короткая, квадруплет (Краков)	Длинная, квадруплет (Лейпциг)	Длинная, квадруплет (Мельбурн)	Длинная, триплет (Оксфорд)
Соединение	+A-B+B-A	+A-B+B-A	+A-B+B-A	+A-B+B-A	+A-B+B-A	-A+A-B
Полная длина системы, м	2,25	1,85	2,3	9,27	8,3	7,4
Расстояние между линзами $s$ , м	0,033	0,033	0,033	0,033	0,03	0,05
Расстояние между линзами $\lambda$ , м	0,754	0,535	0,64	2,45	0,03	0,05
Рабочее расстояние $g$ , мм	110	110	150	300	155	152
Эффективная длина квадруполя, мм	80	80	64	64	27,7	108
Диаметр полюсного зазора, мм	12,7	12,7	12,7	12,7	12	15
Максимальное поле квадруполя, 3 МэВ протоны, Т	0,287	0,278	0,323	0,2	-0,227	0,218
Уменьшение:						
$D_x$	22	14	17,6	110	-25	92
$D_y$	22	14	17,6	110	-25	-26
Ротационные aberrации, мкм/мрад <sup>2</sup> :						
$\langle x/\phi r_1 \rangle$ , $\langle y/\theta r_1 \rangle$	1,4	2	2	6	-26	7; -29
$\langle x/\phi r_2 \rangle$ , $\langle y/\theta r_2 \rangle$	0,7	1	0,1	-3	63	14; -61
$\langle x/\phi r_3 \rangle$ , $\langle y/\theta r_3 \rangle$	12	7	13	188	-51	-20; 90
$\langle x/\phi r_4 \rangle$ , $\langle y/\theta r_4 \rangle$	-14	-10	-15	-191	14	-
Хроматические aberrации, мкм/мрад <sup>3</sup> / %:						
$\langle x/\theta \delta \rangle$	-339	-252	-281	-1861	130	-343
$\langle y/\phi \delta \rangle$	-62	-56	-68	-542	173	873
Сферические aberrации, мкм/мрад <sup>3</sup> :						
$\langle x/\theta^3 \rangle$	224	77	161	64270	-112	426
$\langle x/\theta \phi^2 \rangle$	21	5,6	26	30530	-370	207
$\langle y/\theta^2 \phi \rangle$	21	5,6	26	30530	-370	-743
$\langle y/\phi^3 \rangle$	4	2	6	4900	-262	-2197
Параметр качества системы $Q$	49	36	33	18	20	24
Максимальный секступольный член, мкм/мрад <sup>2</sup> / %	$\langle x/\theta^2 s \rangle$	$\langle x/\theta^2 s \rangle$	$\langle x/\theta^2 s \rangle$	$\langle x/\theta^2 s \rangle$	$\langle y/\theta \phi s \rangle$	$\langle y/\theta \phi s \rangle$
	-1008	-491	-665	-41350	-827	1733
Максимальный октупольный член, мкм/мрад <sup>3</sup> / %	$\langle x/\theta^3 o \rangle$	$\langle x/\theta^3 o \rangle$	$\langle x/\theta^3 o \rangle$	$\langle x/\theta^3 o \rangle$	$\langle y/\phi^3 o \rangle$	$\langle y/\theta^3 o \rangle$
	-1501	-512	-821	410000	-1530	18986

размеров этих щелей (при установленной конфигурации ЗФС, заданных величинах яркости, энергии и тока пучка протонов на мишени) позволяет устранить, до известных пределов, нежелательные деградационные «хвосты» на пятне пучка в плоскости изображения, обусловленные наличием некоторых видов паразитических линзовых аберраций в системе.

При определении параметров искомой ЗФС были использованы геометрические размеры квадрупольных линз (см. табл. 1, вторая 2), оптимизированные автором для ультракороткого ( $l = 1,85$  м) ядерного микронзонда Лейпцигского университета [7].

Испытания новой послелинзовой системы сканирования пучка ионов на Краковском ядерном микронзонде продемонстрировали ряд ее достоинств [10, 11]. В частности, эта короткая (по направлению движения ионов) электромагнитная система с ферритовыми сердечниками позволяет осуществлять линейное отклонение пучка протонов с энергией 1 МэВ, с достаточной амплитудой (до 250 мкм) и с коротким рабочим расстоянием (до 11 см).

В данной работе полагается, что пучок протонов ( $\delta = 0,05\%$ ,  $W \leq 3$  МэВ) для ядерного зонда создается с помощью традиционного электростатического ускорителя ионов типа Ван де Граафф. Такой ускоритель, оснащенный оптимизированным радиочастотным источником ионов, позволяет получить параксиальный протонный пучок с яркостью до 25 пкА/мкм<sup>2</sup>/мрад<sup>2</sup>/МэВ [12]. Это, в частности, позволяет коротким ЗФС обеспечивать работу зонда в сильноточной моде с помощью относительно малых апертур (< 25 мкм) объектной щели [6].

Следующие параметры варьировались: полная длина ( $1 \leq l \leq 3$  м) ЗФС, расстояние  $\lambda$  между второй и третьей линзами, размеры апертур объектной щели ( $1 \leq d_l \leq 25$  мкм) и углового коллиматора ( $5 \leq d_2 \leq 500$  мкм), возбуждения квадрупольных линз ( $0,1 \leq k_i \leq 1,3$ , где  $i = 1, \dots, 4$ ).

Оптимизационный поиск ЗФС осуществлялся с помощью известных во всем мире ионно-оптических программ: PRAM и OXRAY [5]. В расчетах учитывались доминирующие внутренние (сферические и хроматические) и паразитические (секступольные, октупольные и ротационные) линзовые аберрации.

Размер пятна от пучка протонов на мишени,  $d = \max\{d_x, d_y\}$ , определялся как функция параметров  $l$  и  $\lambda$ . Полагалось, что пучок протонов имеет однородную по сечению яркость, а объектная щель и угловой коллиматор имеют прямоугольные апертуры.

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты оптимизационных расчетов для новой ЗФС представлены в табл. 1 (первая колонка). Во второй колонке приведены физические параметры ультракороткой системы [7]. В третьей колонке приведены параметры ЗФС Краковского микронзонда [9 - 11]. Это первая в мире действующая короткая (2,3 м) система, основанная на разделенном «русском» квадруплете магнитных квадрупольных линз. При тестировании параметров этой ЗФС было достигнуто пространственное разрешение 3,3 мкм для пучка протонов с энергией 2,4 МэВ в сильноточной моде [9]. В четвертой – шестой колонках приведены данные типичных действующих длинных ЗФС, использующих квадруплет или триплет магнитных квадрупольных линз [4, 5, 7, 13]. Для того чтобы обеспечить значительные коэффициенты уменьшения ( $D$ ), эти системы имеют относительно большие длины (>7 м) при относительно малом рабочем расстоянии ( $0,15 \leq g \leq 0,3$  м). За это приходится платить высокой чувствительностью этих систем к паразитическим (секступольным, октупольным, ротационным) и внутренним (сферическим и хроматическим) линзовым аберрациям. По некоторым из этих причин в длинных ЗФС используются довольно дорогие прецизионные квадрупольные линзы, изготовленные с помощью электроэрозионного станка с допусками на уровне 3 – 5 мкм [14].

Качественный анализ возможности ЗФС обеспечивать максимальный ток пучка при заданном его размере на мишени может быть выполнен с помощью коэффициента ее

качества:  $Q = D_x D_y / (\langle x/\theta \rangle^3 + \langle y/\phi \rangle^3)^{1/3}$  [13]. При этом предполагается, что сферические aberrации являются доминирующими в ЗФС.

Как видно из табл. 1 (первые три колонки), короткие ЗФС, обеспечивая достаточно высокие коэффициенты уменьшения, в отличие от традиционных длинных систем демонстрируют значительно более низкую чувствительность как к паразитическим, так и к внутренним линзовым aberrациям. Поэтому короткие системы имеют более высокие коэффициенты  $Q$ , чем традиционные ЗФС. Наиболее выигрышно по этому параметру выглядит новая короткая система ( $Q = 49$ ).

Табл. 2 и 3 демонстрируют уникальную возможность для этой системы быть использованной в качестве ЗФС ядерного нанозонда в обеих токовых модах. При этом в ней, в качестве фокусирующих элементов, могут быть использованы квадрупольные линзы с относительно высоким содержанием паразитических компонент (0,3 – 1 %) в поле их полюсных наконечников. Полюсные наконечники этих линз могут быть изготовлены с помощью токарного станка с допусками на уровне ~15 – 40 мкм. Себестоимость изготовления таких линз более чем в три раза ниже традиционных [14]. Регулируемый дублет подобных линз был изготовлен в мастерских Института ядерной физики (Краков, Польша) [7, 9]. В настоящее время он эффективно используется в системе транспортировки пучка ионов Краковского ядерного микронзонда [9]. Этот дублет будет использован в качестве прототипа для фокусирующего элемента новой короткой ЗФС (см. табл. 1 - 3).

Таблица 2. Расчетные зондовые пространственные разрешения, полученные с помощью коротких ЗФС в сильноточной моде\*

Параметры	Системы		
	Новая	Лейпцигская	Краковская
Яркость пучка, пкА/мкм <sup>2</sup> /мрад <sup>2</sup> /МэВ	18	18	18
Разброс протонов по импульсам, %	0,05	0,001	0,05
Размер апертур объектной щели $d_{lx} \times d_{ly}$ , мкм × мкм	12 × 12	10 × 10	20 × 20
Расходимость пучка, мрад × мрад	0,02 × 0,145	0,06 × 0,35	0,063 × 0,134
Разрешение зонда при 0,3 % в 3-й линзе и 1 % секстипольных и октупольных aberrаций во всех остальных линзах, мкм	0,95	1,2	1,4

\*Моделирование основано на анализе траекторий 10000 протонов, распределенных случайным образом в пределах фазового пространства, заданного объектной щелью и угловым коллиматором.

Таблица 3. Расчетные зондовые пространственные разрешения, полученные с помощью коротких ЗФС в слаботочной моде\*

Размер апертур объектной щели $d_{lx} \times d_{ly}$ , мкм × мкм	5 × 5	1 × 1
Размер апертур щели углового коллиматора $d_{2x} \times d_{2y}$ , мкм × мкм	5 × 5	5 × 5
Разрешение зонда $d_x \times d_y$ с новой системой, мкм × мкм	0,26 × 0,24	0,065 × 0,050
Разрешение зонда $d_x \times d_y$ с Лейпцигской системой, мкм × мкм	0,38 × 0,36	0,080 × 0,070
Разрешение зонда $d_x \times d_y$ с Краковской системой, мкм × мкм	0,35 × 0,30	0,060 × 0,055

\*Моделирование основано на анализе траекторий 10000 протонов, распределенных случайным образом в пределах фазового пространства, заданного объектной щелью и угловым коллиматором.

Как видно из табл. 3, новая короткая ЗФС позволяют реализовывать высокие пространственные разрешения (до 60 – 260 нм) и в слаботочной моде (0,1 – 1 пкА). На этой моде реализуются такие зондовые методики, как сканирующая трансмиссионная ионная микроскопия или ионно-пучковое возбуждение тока [5].

Следует отметить также важное достоинство предлагаемой ЗФС - возможность использовать в ней стандартные круглые апертуры в качестве объектной щели в обеих токовых модах. Полученные результаты численного моделирования планируется использовать в ближайшем будущем при разработке конструкции нового Лейпцигского ядерного зонда с внешним пучком (выведенным в атмосферу) [7].

#### 4. Заключение

Автором предложена оптимизированная короткая зондоформирующая система для сканирующего ядерного зонда. Показано, что эта система способна обеспечить протонный зонд с энергией 3 МэВ субмикронным пространственным разрешением во всех токовых модах, используя для этого магнитные квадрупольные линзы с относительно высоким содержанием паразитических компонент (0,3 – 1 %).

Данную ЗФС наиболее перспективно использовать в установке следующего поколения – вертикальном сканирующем ядерном нанозонде с внешним пучком ионов. Такая установка позволит проводить уникальные исследования как с неорганическими, так и органическими объектами (например, живыми клетками) в нормальных условиях [15].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jamieson D. N.* New Generation Nuclear Microprobe Systems // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2001. - Vol. B. 181. - P. 1 - 11.
2. *Jamieson D.N. and Legge G.J.F.* Aberrations of Single Magnetic Quadrupole Lenses // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1987. - Vol. B. 29. - P. 544 - 556.
3. *Jamieson D., Zhu J., Mao Y., et. al.* Grid Shadow Pattern Analysis of Shanghai Nuclear Microprobe // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1995. - Vol. B. 104. - P. 86 - 92.
4. *Grime G.W. and Watt F.* Beam Optics of Quadrupole Probe-Forming Systems. - Bristol, 1984. - 273 p.
5. *Breese M., Jamieson D. and King P.* Materials Analysis with a Nuclear Microprobe. - N. Y., - 1996. - 423 p.
6. *Lebed S.* Optimized Short Focusing Systems for a Nuclear Microprobe // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1999. - Vol. B. 152. - P. 145 - 149.
7. *Lebed S., Butz T., Vogt J. et. al.* A Novel Ultra-short Scanning Nuclear Microprobe: Design and Preliminary Results // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2001. - Vol. B. 181. - P. 32 - 38.
8. *Лебедь С.* Двухрежимная зондоформирующая система для современного ядерного нанозонда // Журнал технической физики. - 2002. - Т. 72, вып. 1. - С. 92 - 95.
9. *Lebed S., Lekki J., Paszkowski M., et al.* A New Nuclear Cracow Scanning Nuclear Microprobe: Performance Tests and Early Application Experience // Вопросы атомной науки и техники. - Сер. Ядерно-физические исследования. - 2001. - № 3 - С. 71 - 73.
10. *Lebed S., Cioch Z., Rys A. et al.* Design and Expected Performance of a New Compact Nuclear Microprobe at the Institute of Nuclear Physics in Cracow // Український фізичний журнал. - 1999. - Т. 4, № 8. - С. 937 - 941.
11. *Lebed S., Stachura Z., Cholewa M. et al.* The New Cracow Scanning Nuclear Microprobe // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2001. - Vol. B. 181. - P. 95-98.
12. *Mous D.J.W., Haitzma R.G., Butz T. et al.* The Novel Ultra-Stable HV EEE 3.5MV Singletron<sup>TM</sup> Accelerator for Nanoprobe Applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1997. - Vol. B. 130. - P. 31 - 36.
13. *Ryan C.G. and Jamieson D.N.* A High Performance Quadrupole Quintuplet Lens System for the CSIRO-GEMOS Nuclear Microprobe // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1999. - Vol. B. 158. - P. 97 - 106.
14. *Jamieson D., Grime G. and Watt F.* The New Oxford Scanning Proton Microprobe Analytical Facility // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1989. - Vol. B. 40/41. - P. 669 - 674.
15. *Kamiya T., Yokota W., Kobayashi Y., et al.* Development of an Automated Single Cell Irradiation System Combined with a High-Energy Heavy Ion Microbeam System // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2001. - Vol. B. 181. - P. 27 - 31.

**НОВА КОРОТКА ЗОНДОФОРМУЮЧА СИСТЕМА  
ДЛЯ СКАНУЮЩЕГО ЯДЕРНОГО НАНОЗОНДА****С. О. Лебедь**

Описано оптимізовану коротку (загальна довжина 2,25 м) зондоформуючу систему, в якій використовується розділений «руський» квадруплет магнітних квадрупольних лінз для фокусування пучка протонів з енергією 3 МеВ. Система дозволяє сформувати на мішені зонда пучок іонів з розмірами плями < 1 мкм у сильноточній моді за допомогою лінз, які мають значний вміст (0,3 – 1 %) паразитичних (секступольних та октупольних) компонент у полі їх полюсних наконечників. В оптимізаційних розрахунках брались до уваги домінуючі внутрішні та паразитичні лінзові аберації. Показано переваги й недоліки альтернативних зондоформуючих систем. Отримані результати чисельного моделювання планується використати при проектуванні вертикального ядерного нанозонда із зовнішнім пучком іонів.

**THE NEW SHORT PROBE-FORMING SYSTEM  
FOR A SCANNING NUCLEAR NANOPROBE****S. A. Lebed**

The paper describes an optimized short (total length of 2,25 m) probe-forming system that uses the divided Russian quadruplet of magnetic quadrupole lenses to focus a 3 MeV proton beam. The system permits to create an ion beam spot size <math><1\mu\text{m}</math> at the probe target in the high current mode with large (0,3 – 1 %) parasitic (sextupole and octupole) pole tip field contamination in the lenses. The optimizing calculations include dominant intrinsic and parasitic lens aberrations. The advantages and shortcomings of the alternative PFSs are shown. The results obtained in the numerical simulation are expected to be used in designing a vertical nuclear nanoprobe with an external ion beam.

Поступила в редакцію 20.08.02,  
после доработки – 20.01.03.