

## Моделирование процессов формирования ионных пучков в зондах с распределенными системами магнитных квадрупольных линз

С.В. Колинько<sup>1,\*</sup>, А.Г. Пономарев<sup>1</sup>, А.А. Дрозденко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58, 40030 Сумы, Украина*

<sup>2</sup> *Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина*

(Получено 01.07.2012; в отредактированной форме – 20.09.2012; опубликовано online 30.10.2012)

Разработана математическая модель, позволяющая учитывать угловое отклонение в магнитных квадрупольных линзах от нормального положения при проводке пучка через зондоформирующую систему. Проведено моделирование матричным методом влияния отклонения каждой линзы на параметры зонда на мишени в распределенных системах магнитных квадрупольных линз для двух наиболее распространенных конфигураций зондоформирующих систем – триплет и «русский квадруплет».

**Ключевые слова:** Ядерный микрозонд, Магнитная квадрупольная линза, Зондоформирующая система, Динамика пучка, Разрешающая способность.

PACS numbers: 41.75. – i, 41.85.Ew, 41.85.Ja,  
41.85.Lc, 07.05.Tr

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Разрешающая способность является основной характеристикой ядерного сканирующего микрозонда (ЯСМЗ), в котором применяются квадрупольные зондоформирующие системы (ЗФС) для фокусировки легких ионов МэВ-ных энергий. Она определяется наиболее интенсивной областью сфокусированного пучка на мишени. Размеры этой области определяют величину зонда, которые, в свою очередь, зависят от размеров объектного коллиматора (ОК), коэффициента уменьшения (КУ) и aberrаций фокусирующей системы. Следовательно, уменьшение размеров зонда и повышение разрешающей способности ЯСМЗ возможно как за счет уменьшения размеров ОК, так и за счет увеличения КУ.

Увеличение КУ сопровождается возрастанием влияния aberrаций на размеры зонда, поэтому после определенного предела (около 500) это увеличение становится неэффективным. Уменьшение размеров ОК сопровождается уменьшением тока пучка, поэтому есть предел, ограничивающий такое уменьшение (около 10 мкА).

Увеличение КУ возможно как за счет уменьшения рабочего расстояния (расстояния между последней линзой и мишенью), так и за счет увеличения расстояния между некоторыми МКЛ в ЗФС. Так, в триплете (ЗФС из трех МКЛ) обычно увеличивают расстояние между первой и второй МКЛ по ходу пучка, а в «русском квадруплете» (ЗФС из четырех МКЛ) – между второй и третьей МКЛ (рис. 1). Предел уменьшения рабочего расстояния определяется конструкциями камеры взаимодействия, линз, сканирующей системы и расположением детектирующих устройств. В настоящее время минимально достижимое рабочее расстояние при наличии в камере детектирующих устройств составляет около 6 см.

Таким образом, построение распределенных в пространстве систем формирования микрозонда яв-

ляется наиболее перспективным решением задачи увеличения КУ и повышения разрешающей способности ЯСМЗ. Частным случаем таких систем являются двухкаскадные установки с формированием промежуточного изображения [1, 2].

В то же время параметры формируемого зонда зависят от качества юстировки МКЛ, в том числе от точности совмещения осей всех линз с осью пучка. Ось линзы – это геометрическое место точек, в которых индукция магнитного поля равна нулю. Особенно важной эта задача является для распределенных зондоформирующих систем, в которых отдельные линзы и группы линз находятся на значительных расстояниях друг от друга. Пучок, проходящий не по оси МКЛ, преломляется в поле линзы и отклоняется от своей оси на некоторый угол [3]. Это отклонение на большом дрейфовом промежутке приводит к существенному смещению пучка от оси. Вход пучка в область поля следующей линзы под углом и на большом расстоянии от оси приводит к значительному возрастанию влияния aberrаций, которые определяют увеличение размеров зонда. Величина этого отклонения зависит от тока питания линзы и меняется в процессе юстировки, что создает дополнительные трудности.

Для изучения степени влияния неточности юстировки МКЛ в распределенных системах формирования микрозонда на параметры зонда на мишени проведено численное моделирование динамики пучка в таких системах с использованием матричного метода [4-6].

### 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Уравнения движения пучка заряженных частиц в магнитном поле с прямолинейной осевой траекторией могут быть представлены в общем виде

\* kolinko@ipflab.sumy.ua

$$\frac{d\vec{Q}}{dz} = \vec{f}(\vec{B}(x, y, z), x', y', \delta), \quad (1)$$

где  $\vec{Q} = (x, y, x', y')^T$  – вектор траекторных фазовых координат частиц,  $\delta = \Delta p/p_0$  – разброс частиц по импульсу,  $\vec{B}(x, y, z)$  – распределение вектора магнитной индукции вдоль оси ЗФС.

Эти уравнения являются нелинейными относительно фазовых координат, и их аналитическое решение не представляется возможным. Поэтому ищется приближенное решение с использованием перехода от описания состояния частицы в обычном траекторном фазовом пространстве к некоторому расширенному бесконечномерному пространству – пространству траекторных фазовых моментов. Анализ и расчет нелинейной динамики пучка заряженных частиц в магнитном поле при таком переходе сводится к системе линейных дифференциальных уравнений, записанных в подпространстве траекторных фазовых моментов конечной размерности, что определяет приближенное решение исходного нелинейного уравнения движения. В этом случае уравнения движения могут быть записаны в виде

$$\frac{d\vec{Q}(z)}{dz} = P(z) \cdot \vec{Q}(z), \quad \vec{Q}(z_0) = \vec{Q}_0, \quad (2)$$

где  $P(z)$  – квадратная матрица, которая определяется осевым распределением магнитного поля,  $\vec{Q}$  – траекторные фазовые моменты размерности третьего порядка.

$$\vec{Q} = (x, x', y, y', x\delta, x'\delta, y\delta, y'\delta, x^3, x^2x', xx'^2, x'^3, xy^2, xyy', xy'^2, x'y^2, x'y'y', x'y'^2, y^3, y^2y', yy'^2, y'^3, yx^2, yxx', yx'^2, y'x^2, y'xx', y'x'^2)^T$$

Траекторный анализ для каждой частицы с использованием (2) нерационален из-за большого количества частиц. Поэтому задача (2) трансформируется в задачу отыскания некоторой матричной функции  $\mathfrak{R}(z/z_0)$ , которая обеспечивает преобразование координат траекторных фазовых моментов каждой частицы из плоскости перпендикулярной оси с координатой  $z_0$  на входе в ионно-оптический элемент в плоскость  $z \leq z_1$ , где  $z_1$  – плоскость на выходе из него.

$$\vec{Q}(z) = \mathfrak{R}(z/z_0) \cdot \vec{Q}(z_0).$$

Тогда задача (2) представляется в виде

$$\frac{d\mathfrak{R}(z/z_0)}{dz} = P(z) \cdot \mathfrak{R}(z/z_0), \quad \mathfrak{R}(z_0/z_0) = E,$$

где  $E$  – единичная матрица.

Зная матричную функцию преобразования каждой магнитной квадрупольной линзы и каждого дрейфового промежутка, динамику частицы в ионно-оптическом тракте можно описать серией матричных преобразований координат ее траекторных фазовых моментов.

$$\vec{Q}(z_n) = \mathfrak{R}(z_n/z_{n-1})\mathfrak{R}(z_{n-1}/z_{n-2})\dots\mathfrak{R}(z_1/z_0)\vec{Q}(z_0)$$

Для учета отклонения от оси какого-либо ионно-оптического элемента или группы элементов можно соответствующим образом преобразовать траекторные фазовые координаты частицы на входе в него и провести обратное преобразование на выходе.

$$\vec{Q}(z_n) = \mathbf{T}_{out}(x, y, x', y', z_n) \cdot \mathfrak{R}(z_n/z_{n-1}) \times \mathbf{T}_{in}(x, y, x', y', z_{n-1}) \cdot \vec{Q}(z_{n-1})$$

где  $\mathbf{T}_{in}$  и  $\mathbf{T}_{out}$  – операторы преобразования координат траекторных фазовых моментов частиц на входе и выходе в магнитную квадрупольную линзу соответственно.

Эти операторы построены с учетом поворотов каждой линзы вокруг поперечных осей  $x$  и  $y$  на некоторый угол, а также смещения линз в этих поперечных направлениях. Такое изменение положения каждой МКЛ как жесткого целого моделирует погрешности юстировки линз в ЗФС.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОПУЧКА РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КВАДРУПОЛЬНЫМИ ЗФС

Моделирование проведено для двух наиболее распространенных конфигураций зондоформирующих систем – триплет и «русский квадруплет» [7] на базе одинаковых МКЛ длиной 50 мм и диаметром апертуры 7.5 мм. Геометрия этих систем приведена на рис. 1. На схематическом изображении линз показана их нумерация по ходу пучка, а так же полярность возбуждения полюсов и номер источника питания.

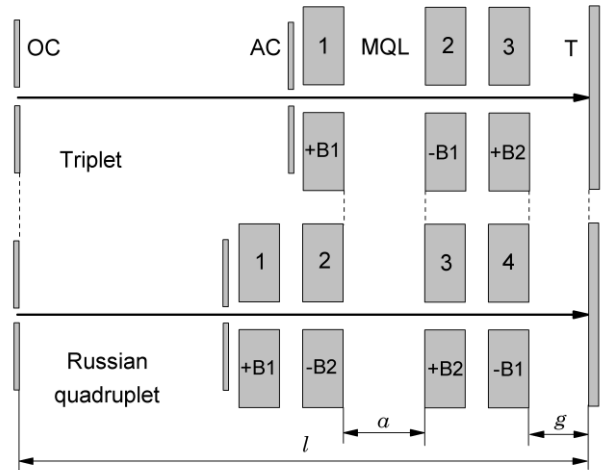


Рис. 1 – Схема систем формирования микропучка на базе конфигураций триплет и «русский квадруплет». ОС – объектный коллиматор, АС – угловой коллиматор, Т – мишень,  $g$  – рабочее расстояние,  $a$  – варьируемый дрейфовый промежуток,  $l$  – длина системы

Для каждой конфигурации был задан набор геометрий фокусирующих систем с неизменными длиной  $l = 750$  см и рабочим расстоянием  $g = 6$  см и вариацией расстояния  $a = 6, 11, 16, 21$  (см) между 1 и 2 линзами для триплета и  $a = 40, 80, 120, 160$  (см)

между 2 и 3 линзами для «русского квадруплета». Диапазон вариации параметра  $a$  выбран из условия, чтобы величина коэффициентов уменьшения находилась в достижимых пределах порядка 100...700, что связано с максимальной величиной магнитной индукции на полюсах МКЛ. Для этого набора систем рассчитаны коэффициенты возбуждения линз из условия стигматической фокусировки пучка и оптимальные размеры коллиматоров, при которых достигается минимальный размер пучка (FWHM) при полном токе  $I_0$  и заданном процентном отношении тока в зонде к полному току  $I_{FWHM}/I_0$ . Затем численно осуществлена проводка частиц пучка в ЗФС матричным методом при различных углах отклонения каждой из линз от нормального положения. Диапазон углов отклонения 0...2 мрад.

На выходе получены распределения плотности тока пучка на мишени и основные параметры этих распределений: максимальная плотность тока, плотность тока на полувывоте, размеры распределения по основанию и на полувывоте, профили распределений по координатам X и Y.

Моделирование проведено с учетом неравномерного распределения плотности частиц в пучке. Начальное распределение плотности частиц в фазовом пространстве определено из распределения яркости в объектной плоскости, которое получено в работе [8] и используется ниже в виде нормального распределения

$$b(x, x', y, y') = b_0 \cdot b_x(x, x') \cdot b_y(y, y'),$$

где

$$b_r(\tau, \tau') = \exp \left[ \frac{-1}{2(1 - \kappa_r^2)} \left( \frac{\tau^2}{\sigma_r^2} - 2\kappa_r \frac{\tau\tau'}{\sigma_r\sigma_{r'}} + \frac{\tau'^2}{\sigma_{r'}^2} \right) \right]$$

$$\tau = (x, y)$$

$b_0 = 7 \text{ pA}/(\mu\text{m}^2 \text{ mrad}^2)$  – осевая яркость пучка,  
 $\sigma_x = 146 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_{x'} = 0.046 \text{ mrad}$ ,  $\kappa_x = -0.54$ ,  
 $\sigma_y = 144 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_{y'} = 0.161 \text{ mrad}$ ,  $\kappa_y = 0.31$ .

#### 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате моделирования проведен анализ влияния на параметры зонда на мишени углового

отклонения отдельных линз при различных геометриях распределенных ЗФС для конфигураций триплет и «русский квадруплет». Исследовано влияние длины дрейфового промежутка на чувствительность распределенной ЗФС к точности юстировки линз. На рис. 2 и 3 представлены диаграммы влияния углового отклонения оси  $\gamma_x$  и  $\gamma_y$  каждой линзы в триплете и квадруплете на размеры пятна на полувывоте и максимальную плотность тока соответственно при максимальной  $a$ . Профили пучка для этого случая представлены на рис. 4. Видно, что для триплета наиболее критична к юстировке вторая линза по ходу пучка, а для квадруплета первая. На рис. 5. приведены зависимости максимальной плотности тока на мишени от угла отклонения наиболее чувствительной линзы при вариации параметра  $a$  для триплета и квадруплета. Видно, что конфигурация «русский квадруплет» значительно более чувствительна к точности юстировки линз по сравнению с триплетом. Увеличение протяженности триплета слабо влияет на чувствительность системы к отклонению линз от нормального положения по сравнению с квадруплетом.

#### 5. ВЫВОДЫ

Построена математическая модель нелинейной динамики пучка в ЗФС, позволяющая с применением преобразования фазовых координат частиц моделировать угловое отклонение МКЛ от нормального положения при проводке пучка через ионно-оптическую систему. Исследовано влияние неточности углового позиционирования линз в распределенных системах МКЛ для конфигураций триплет и «русский квадруплет» при различных геометриях фокусирующих систем на параметры сфокусированного пучка. Моделирование проведено с учетом неравномерного фазового распределения плотности частиц в пучке. Конфигурация «русский квадруплет» значительно более требовательна к точности юстировки линз, чем триплет. Расчеты показали, что основными критериями оценки влияния угловой неточности позиционирования линз на параметры зонда являются максимальная плотность тока и линейные размеры зонда, которые определяются на полувывоте распределения плотности тока.

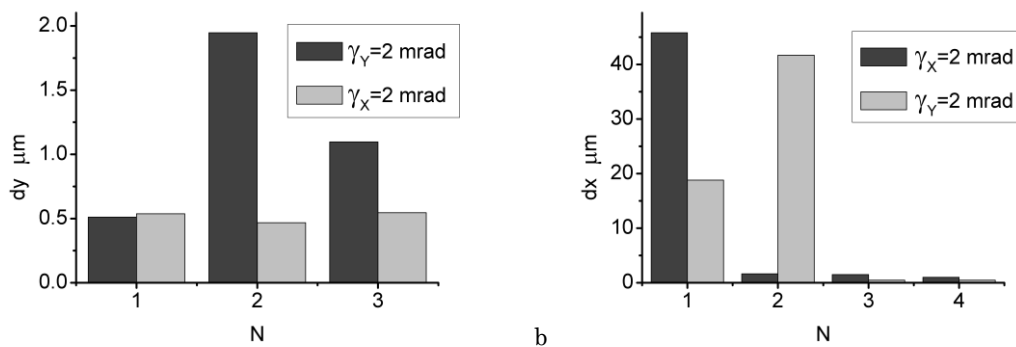


Рис. 2 – Влияние углового отклонения оси каждой линзы в триплете (а) и квадруплете (б) на размеры пятна на полувывоте

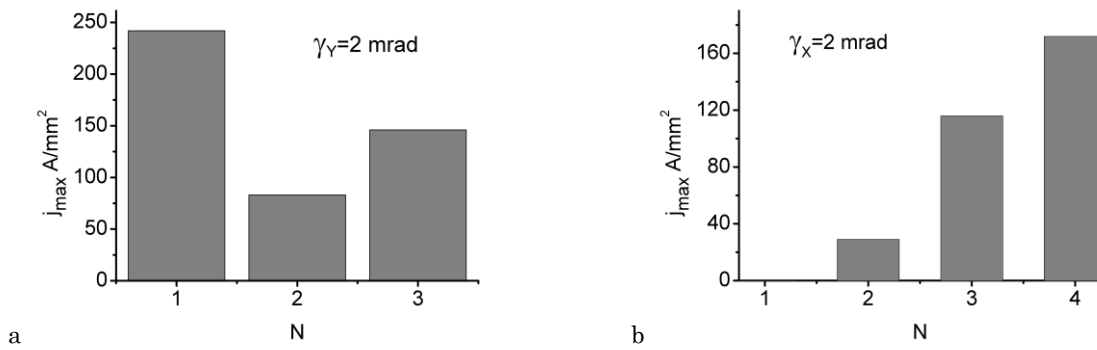


Рис. 3 – Влияние углового отклонения оси каждой линзы в триплете (а) и квадруплете (б) на максимальную плотность тока в пучке

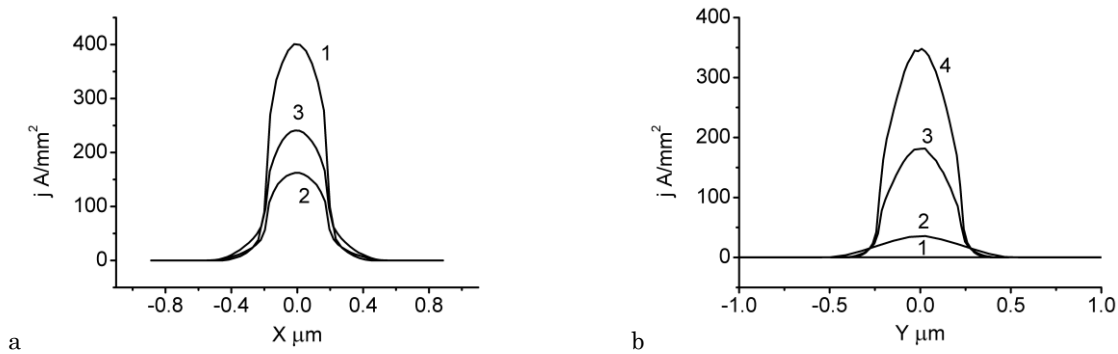


Рис. 4 – Профили пучка при отклонении оси каждой линзы триплета (а) и квадруплета (б) на 2 мрад от оси пучка при  $a = 21$  см и  $a = 160$  см соответственно

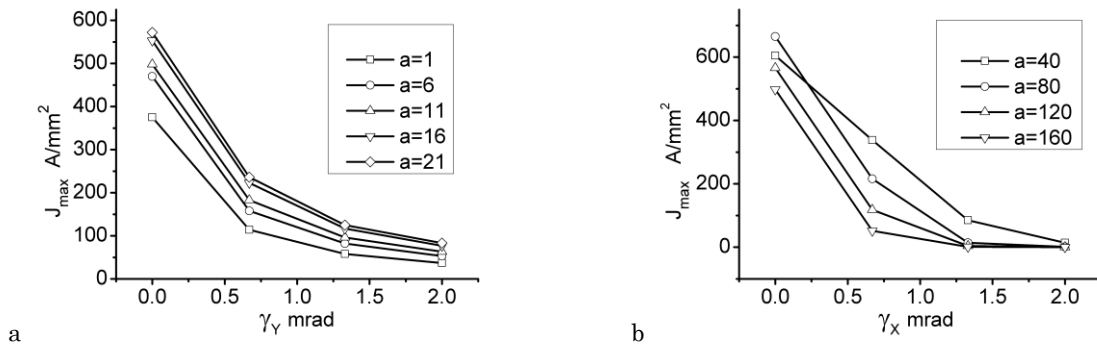


Рис. 5 – Зависимость максимальной плотности тока на мишени от угла отклонения наиболее чувствительной линзы при вариации параметра  $a$  (см) для триплета (а) (2-я линза) и квадруплета (б) (1-я линза)

### Simulation of the Probe Formation Processes in the Separated Systems of Magnetic Quadrupole Lenses

S.V. Kolinko<sup>1</sup>, A.G. Ponomarev<sup>1</sup>, A.A. Drozdenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 58, Petropavlivska Str., 40030 Sumy, Ukraine

<sup>2</sup> Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

A numerical scheme for simulation of the particles transport thru the probe-forming system with an angle displacement of the magnetic quadrupole lenses from normal position was developed. An effect of each lens displacement for microprobe parameters in separated probe-forming systems for both widespread configurations – triplet and Russian Quadruplet was studied.

**Keywords:** Nuclear microprobe, Magnetic quadrupole lens, Probe-forming system, Beam dynamics, Resolution.

**Моделювання процесів формування іонних пучків в зондах з розподіленими системами магнітних квадрупольних лінз**С.В. Колінько<sup>1</sup>, О.Г. Пономарьов<sup>1</sup>, О.О. Дрозденко<sup>2</sup><sup>1</sup> Сумський Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, 40030 Суми, Україна<sup>2</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

Розроблена математична модель яка дозволяє враховувати кутове відхилення в магнітних квадрупольних лінзах від нормального положення при проведенні пучка через зондоформуючу систему. Проведено моделювання матричним методом впливу відхилення кожної лінзи на параметри зонда на мішені в розподілених системах магнітних квадрупольних лінз для двох найбільш розповсюджених конфігурацій зондоформуючих систем – триплет та «руській квадруплет».

**Ключові слова:** Ядерний мікрозонд, Магнітна квадрупольна лінза, Зондоформуюча система, Динаміка пучка, Роздільна здатність.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Ph. Barberet, L. Daudin, N. Gordillo, S. Sorieul, M. Simon, H. Seznec, I. Idarraga, S. Incerti, A. Balana, Ph. Moretto, *Nucl. Instrum. Meth. B* **269**, 2163 (2011).
2. M.J. Merchant, G.W. Grime, K.J. Kirkby, R. Webb, *Nucl. Instrum. Meth. B* **260**, 8 (2007).
3. I. Pinayev, *Nucl. Instrum. Meth. A* **570**, 351 (2007).
4. А.Д. Дымников, Г.М. Осетинский, *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. **20** No 3, 694 (1989).
5. A. Dymnikov, R. Helborg, *Nucl. Instrum. Meth. A* **330**, 323 (1993).
6. A. Dymnikov, R. Helborg, *Nucl. Instrum. Meth. A* **330**, 343 (1993).
7. A.D. Dymnikov, T.Ya. Fishkova, S.Ya. Yavor, *Sov. Phys. – Tech. Phys.* **10**, 340 (1965).
8. A.A. Ponomarov, V.I. Miroshnichenko, A.G. Ponomarev, *Nucl. Instrum. Meth. B* **267**, 2041 (2009).