

**ОПТИМИЗАЦИЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА  
КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ**

© 2010 С. А. Вершинский, А. Г. Пономарев, В. Е. Сторишко,  
В. Л. Денисенко, М. В. Ильяшенко

*Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы*

Для источника квазимонохроматического рентгеновского излучения была выбрана ионно-оптическая система, состоящая из двух дублетов электростатических квадрупольных линз. Рассмотрены два варианта запитывания линз, обеспечивающих стигматическую фокусировку: с двумя и четырьмя независимыми источниками питания. Показано, что использование четырех независимых источников питания позволяет улучшить параметры сфокусированного ионного пучка на конвертере.

*Ключевые слова:* ионно-оптическая система, электростатические квадрупольные линзы, независимое запитывание линз, электростатический ускоритель, квазимонохроматический источник рентгеновского излучения.

**Введение**

Потребности науки и техники стимулируют исследования в области создания лабораторных источников рентгеновского излучения. Для источников, в которых генерация рентгеновского излучения происходит под действием электронных пучков, принципиальной проблемой является высокий уровень тормозного излучения электронов. При этом рентгеновское излучение можно монохроматизировать с использованием фильтров или монохроматоров, но это приводит к снижению интенсивности излучения. В то же время применение протонных пучков с энергией 2 МэВ позволяет получить одинаковый с электронным пучком 30 - 50 кэВ выход излучения К-линий, но при этом на два порядка снизить фон тормозного излучения [1].

Характеристики источника квазимонохроматического рентгеновского излучения, который создается на базе аналитического ускорительного комплекса (АУК) ИПФ НАН Украины, в значительной мере зависят от тока и размеров ионного пучка на конвертере [2 - 4]. С целью увеличения яркости источника необходимо уменьшить размеры ионного пучка на конвертере и при этом сконцентрировать в этой области максимально возможную долю первоначального тока пучка. Для этого предлагается использовать дублеты электростатических квадрупольных линз (ЭКЛ), фокусирующие свойства которых не зависят от отношения заряда к массе ионов. Один дублет ЭКЛ уже установлен на прямом канале ускорителя, однако при стигматической фокусировке дублет ЭКЛ имеет существенно разные коэффициенты уменьшения вдоль двух взаимно перпендикулярных осей X и Y, лежащих в плоскости сечения пучка, что приводит к фокусировке пучка в "линейный фокус". Известно, что при необ-

ходимости сжатия ионного пучка в двух перпендикулярных направлениях широко используются системы из четырех квадрупольных линз – квадруплеты. В данной работе рассматривается выбор оптимальных параметров для использования квадруплета ЭКЛ.

**Выбор рабочего расстояния  
ионно-оптической системы**

Поскольку средняя энергия ионов в пучке на выходе из ускорителя  $\epsilon_0$  составляет величину нескольких мегаэлектрон-вольт, то динамика пучка в электростатических ионно-оптических системах описывается с достаточной степенью точности нерелятивистскими траекторными уравнениями движения заряженных частиц:

$$x'' = \frac{1}{2[u_0(1 + \delta) - u(x, y, z)]} (E_x - x'E_z)(1 + x'^2 + y'^2), \tag{1}$$

$$y'' = \frac{1}{2[u_0(1 + \delta) - u(x, y, z)]} (E_y - y'E_z)(1 + x'^2 + y'^2),$$

с начальными условиями

$$x(z_0) = x_0, x'(z_0) = x'_0, y(z_0) = y_0, y'(z_0) = y'_0, \tag{2}$$

где  $u_0$  – потенциал высоковольтного терминала электростатического ускорителя;  $\delta$  – относительное отклонение энергии частицы от средней величины  $\delta = (\epsilon - \epsilon_0)/\epsilon_0$ ;  $u(x, y, z)$  – потенциал ЭКЛ;  $E_x, E_y, E_z$  – составляющие напряженности электрического поля;  $x, y, x', y'$  – координаты, задающие соответственно смещение и направление движения частицы пучка относительно оси Z.

Учитывать влияние пространственного заряда на протонный пучок необходимо, когда перванс

$Q > 4 \cdot 10^{-7} \frac{A}{B^{3/2}}$  [5]. Так как ток пучка в электростатических ускорителях с энергией нескольких мегаэлектрон-вольт составляет величину до 1 мА, то в уравнениях (1) не учитывается пространственный заряд пучка, поскольку перванс  $Q \approx 10^{-13} \frac{A}{B^{3/2}}$ .

Приближенное решение задачи Коши для уравнений (1) с начальными условиями (2) ищется как преобразование исходных фазовых координат из плоскости объекта  $(x_0, x'_0, y_0, y'_0)$  в плоскость мишени  $(x_t, y_t)$  в следующем виде:

$$x_t = x_0 / D_x(\tau) + C_{px}(\tau)x'_0\delta + \sum_{\substack{i,j \\ i+j=3}} \langle x / x_0^i y_0^j \rangle(\tau) x_0^i y_0^j, \tag{3}$$

$$y_t = y_0 / D_y(\tau) + C_{py}(\tau)y'_0\delta + \sum_{\substack{i,j \\ i+j=3}} \langle y / x_0^i y_0^j \rangle(\tau) x_0^i y_0^j,$$

где  $D_x(\tau), D_y(\tau)$  – коэффициенты уменьшения вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $C_{px}(\tau), C_{py}(\tau)$  – коэффициенты хроматической аберрации;  $\langle x / x_0^i y_0^j \rangle(\tau), \langle y / x_0^i y_0^j \rangle(\tau)$  – коэффициенты сферической аберрации;  $\tau$  – вектор параметров ионно-оптической системы.

Все аберрационные коэффициенты в формуле (3) зависят от вектора  $\tau = (a, s, \lambda, g, L_{эф}, r_a)^T$ , который определяет параметры ионно-оптической системы (рис. 1), где  $a$  – расстояние от плоскости объекта до эффективной границы поля первой линзы;  $s, \lambda$  – расстояния между эффективными границами поля линз;  $g$  – рабочее расстояние (расстояние от эффективной границы поля последней линзы до конвертера);  $L_{эф}$  – эффективная длина линз;  $r_a$  – радиус апертуры линз.

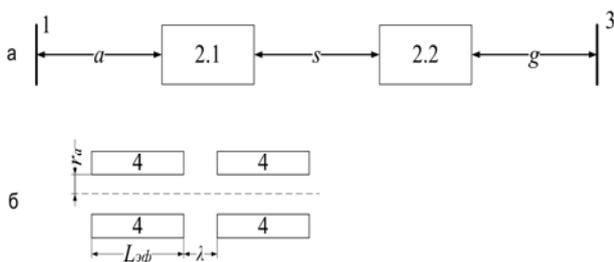


Рис. 1. Геометрия ионно-оптической системы: а - схема квадруплета ЭКЛ; б - параметры дублета ЭКЛ. 1 - плоскость объекта; 2.1, 2.2 - дублеты ЭКЛ; 3 - конвертер; 4 - цилиндрические электроды дублета ЭКЛ в вертикальной плоскости.

Для расчета коэффициентов уменьшения и аберраций, которые определяют ионно-оптические свойства системы, применялся метод мат-

ричантов, изложенный в [6] и реализованный в численном коде PROBFORM [7]. Для проведения моделирования был выбран вектор параметров  $\tau = (0,88; 1,485; 0,01; g_i; 0,14; 0,02)^T$ , где  $0,11 \text{ м} \leq g_i \leq 0,5 \text{ м}$ . Выбор параметров определяется технологическими ограничениями, связанными с возможностью размещения ионно-оптических элементов системы. При оценке размеров пятна количество частиц пучка, попадающих на конвертер в область, ограниченную размерами  $l_x \times l_y$ , должно было составлять не менее 80 %. Начальные параметры частиц генерировались на основании экспериментально измеренного эмиттанса пучка АУК ИПФ НАН Украины [8].

Из результатов моделирования, представленных на рис. 2, видно, что существует область значений  $g$ , для которой размеры ионного пучка на конвертере принимают оптимальные значения, при этом пятно имеет форму, близкую к окружности. Существование области оптимальных значений  $g$  объясняется тем, что с уменьшением  $g$  коэффициенты уменьшения системы растут, но при этом аберрации резко увеличиваются, поэтому при оптимальном соотношении коэффициентов уменьшения и аберраций достигается возможность создания на конвертере максимальной концентрации частиц в пятне с минимальными размерами. Это обеспечивает максимальный выход рентгеновского излучения с минимальной площади поверхности конвертера, что позволяет повысить яркость рентгеновского квазимонохроматического источника.

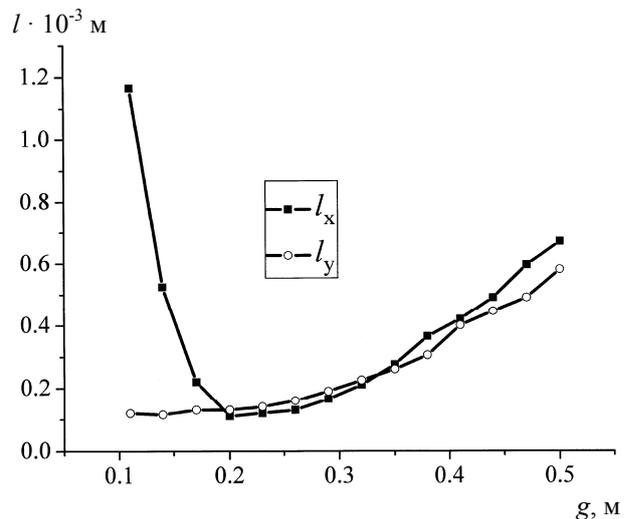


Рис. 2. Зависимость размера ионного пятна на конвертере вдоль оси  $x$  и  $y$  от рабочего расстояния.

На основе проведенного анализа для реализации источника квазимонохроматического рентгеновского излучения было выбрано рабочее расстояние, равное 0,23 м.

### Выбор вариантов запитывания квадруплета ЭКЛ

Минимальное количество источников питания, с применением которых возможно обеспечить условия стигматической фокусировки в двух перпендикулярных оси пучка направлениях, равняется двум.

Результаты, представленные на рис. 2, были получены в предположении, что запитывание ЭКЛ осуществляется от двух источников питания по схеме “русского квадруплета”. Это широко используемый для задач зондоформирования вариант запитывания ЭКЛ. В то же время существует вариант запитывания с применением четырех независимых источников питания, который также может обеспечить условия стигматической фокусировки ионного пучка [9]. При этом

Количество независимых источников питания, шт.	2	4
Рабочее расстояние, м	0,23	0,23
Напряжения на электродах ЭКЛ, В		
$V_1; V_2$	49121; -33864	-20300; 2100
$V_3; V_4$	33864; -49121	32308; -46493
Коэффициенты уменьшения $D_x, D_y$	$9,1 \times 9,1$	$-9,5 \times 16,5$
Аберрации:		
хроматические, мкм/(мрад%), $C_{px}; C_{py}$	-463; -112	416; -122
сферические, мкм/(мрад <sup>3</sup> ), $\langle x/x'^3 \rangle; \langle x/x'y'^2 \rangle$	100; -1	-93; 5
$\langle y/y'^3 \rangle; \langle y/y'x'^2 \rangle$	3; -1	11; -3
Поперечные размеры пятна на конвертере, Н <sup>+</sup> , 2 МэВ, 80 % первоначального тока пучка, мкм <sup>2</sup>	120 × 140	110 × 85

### Заключение

В работе проведен анализ вариантов запитывания квадруплета ЭКЛ с использованием двух и четырех независимых источников питания. Моделирование показало, что использование

напряжения на электродах первых двух ЭКЛ по ходу пучка (2.1, см. рис. 1) являются свободными параметрами, а напряжения на оставшихся линзах (2.2, см. рис. 1) выбираются из условия обеспечения стигматической фокусировки. Для проведения моделирования был выбран расширенный вектор параметров  $\tau = (0,88; 1,485; 0,01; 0,23; 0,14; 0,02; V_1; V_2)^T$ , где  $V_1$  и  $V_2$  – напряжения запитывания дублета ЭКЛ (2.1, см. рис. 1). Значения  $V_1$  и  $V_2$  варьировались в пределах от -50 до +50 кВ.

Из результатов моделирования, представленных ниже, видно, что использование четырех независимых источников питания позволяет заметно уменьшить поперечные размеры пятна на конвертере при том же токе, что позволит увеличить яркость источника квазимонохроматического рентгеновского излучения.

четырёх независимых источников питания позволит увеличить яркость источника, что сократит время проведения измерений при реализации выбранного метода анализа с применением источника квазимонохроматического рентгеновского излучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Folkmann F., Gaarde C., Huuns T., Kemp K.* Proton induced X-ray emission as a tool for trace element analysis // Nucl. Instr. and Meth. - 1974. - Vol. 116. - P. 487 - 499.
2. *Проект* источника квазимонохроматического рентгеновского излучения на базе ускорителя протонов, снабженного рентгенооптической системой / Л.Г. Шабельников, В.Л. Денисенко, М.В. Ильяшенко, В.Е. Сторишко, А.А. Дрозденко, С.А. Вершинский // Металлофиз. новейшие технол. - 2010. - Т. 32, вып. 1. - С. 1 - 12.
3. *Джерело* рентгеновського випромінювання / В.Ю. Сторишко, М.В. Ілляшенко, О.О. Дрозденко, В.Л. Денисенко, С.О. Вершинський // Деклараційний патент на корисну модель, UA 49031, H05G 2/00, H01J 35/00, u200911832 (12.04.2010, бюл. № 7).
4. *Спосіб* генерації рентгеновського випромінювання / В.Ю. Сторишко, М.В. Ілляшенко, О.О. Дрозденко, В.Л. Денисенко, С.О. Вершинський // Деклараційний патент на корисну модель, UA 49032, H05G 2/00, H01J 35/00, u200911833 (12.04.2010, бюл. № 7).
5. *Szilagyi M.* Electron and ion optics. Ch. 12. - New York and London: Plenum Press, 1988. - 539 p.
6. *Дымников А.Д., Осетинский Г.М.* Система формирования протонных пучков микронных размеров // Физика элементарных частиц и атомного ядра. - 1989. - Т. 20, вып. 3. - С. 694 - 733.
7. *Ponomarev A.G., Melnik K.I., Miroshnichenko V.I.* Parametric multiplets of magnetic quadrupole lenses: application prospects for probe-forming systems of nuclear microprobe // Nucl. Instr. and Meth. B - 2005. - Vol. 231. - P. 86 - 93.
8. *Сторишко В.Е., Дрозденко А.А., Мирошниченко В.И., Пономарев А.Г.* Микроаналитический комплекс на базе компактного электростатического ускорителя ИПФ НАН Украины // Proc. Int. Conf. “Current Problems Nucl. Phys. At. Energy” NPAE-2006 (Kyiv, Ukraine, May 29 - June 3, 2006. -

Київ, 2007. - Р. 745 - 753.

9. Пономарев А.Г., Воробьев Г.С., Пономарева А.А.  
Оптимизация квадрупольной зондоформирующей

системы с индивидуальными источниками питания линз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. - 2010. - Т. 53, вып.2. - С. 58 - 64.

### **ОПТИМІЗАЦІЯ ІОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЖЕРЕЛА КВАЗІМОНОХРОМАТИЧНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА**

**С. О. Вершинський, О. Г. Пономарьов, В. Ю. Сторіжко, В. Л. Денисенко, М. В. Ілляшенко**

Для джерела квазімонохроматичного рентгенівського випромінювання було обрано іонно-оптичну систему, що складається з двох дублетів електростатичних квадрупольних лінз. Розглянуто два варіанти живлення лінз, що забезпечують стигматичне фокусування: з двома та чотирма незалежними джерелами живлення. Показано, що використання чотирьох незалежних джерел живлення дозволяє покращити параметри сфокусованого іонного пучка на конвертері.

*Ключові слова:* іонно-оптична система, електростатичні квадрупольні лінзи, незалежне живлення лінз, електростатичний прискорювач, квазімонохроматичне джерело рентгенівського випромінювання.

### **OPTIMIZATION OF ION-OPTICS SYSTEM FOR X-RAY QUASI-MONOCROMATIC SOURCE ON THE BASIS OF ELECTROSTATIC ACCELERATOR**

**S. O. Vershynskiy, O. G. Ponomarev, V. Yu. Storizhko, V. L. Denysenko, M. V. Iljashenko**

Ion-optics system with two doublets of electrostatic quadrupole lenses for X-ray quasi-monochromatic source was selected. Two variants of lens excitation for stigmatic focusing with two and four independent power supplies are considered. It is shown that using of four independent power supplies leads to improvement of focused ion beam parameters at converter.

*Keywords:* ion-optics system, electrostatic quadrupole lenses, independent lens excitation, electrostatic accelerator, quasi-monochromatic X-ray source.

Поступила в редакцію 29.04.10,  
после доработки - 14.07.10.