

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ЗОНДОВЫХ СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННЫХ ПУЧКОВ МУЛЬТИПЛЕТАМИ МАГНИТНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ СО СВОБОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А.А. ПОНОМАРЕВА

Оптимизированы геометрические параметры и количество магнитных квадрупольных линз в зондоформирующей системе со свободными параметрами. Условно линзовая система разбита на подсистему согласования и подсистему финальной фокусировки, где линзы первой подсистемы имеют питание от независимых источников, которые представляют собой свободные параметры. Питание второй подсистемы осуществляется от двух независимых источников, которые являются связанными параметрами, определяющими условие создания стигматической фокусировки пучка на поверхности мишени. Сформулирована и решена задача оптимизации процесса формирования пучка ионов в квадрупольных зондовых системах со свободными параметрами, которая относится к задаче нелинейного программирования. В качестве критерия оптимальности выбрана величина приведенного аксептанса, которая пропорциональна плотности тока пучка на мишени. Показано, что целесообразным является ограничение количества линз до четырех для рассматриваемой зондоформирующей системы.

Ключевые слова: микронзонд, ионный пучок, мультиплет магнитных квадрупольных линз, приведенный аксептанс.

ВВЕДЕНИЕ

Системы формирования пучков легких ионов водорода или гелия, ускоренных до энергии нескольких МэВ, применяются в аппаратных комплексах ядерного сканирующего микронзонда (ЯСМЗ). Высокая магнитная жесткость пучков ионов МэВ-ных энергий обуславливает применение в ЯСМЗ ионно-оптических элементов с сильной фокусировкой, к которым относятся магнитные квадрупольные линзы (МКЛ). В силу физических особенностей одиночная МКЛ обеспечивает фокусировку пучка только в одной поперечной плоскости, поэтому для получения сфокусированного пучка в обеих поперечных к оси пучка плоскостях применяются системы из нескольких МКЛ. С помощью такой системы пучок формируется в зонд микрометрических размеров с возможностью электромагнитного двухкоординатного сканирования. ЯСМЗ в настоящее время широко применяется в исследованиях структуры и элементного состава материалов различного происхождения [1, 2]. Одними из сравнительно новых приложений ЯСМЗ являются фабрикация 3D микро- и наноразмерных структур в результате прямого экспонирования резистивных материалов сфокусированным протонным пучком (PBW — proton beam writing) [2, 3], которая относится к литографическим технологиям высокого разрешения. Поэтому здесь предъявляются требования уменьшения размеров зонда до уровня 10 нм и обеспечения достаточно высокой плотности тока, что связано со скоростью экспонирования. Это, в свою очередь, определяет необходимость поиска новых типов зондоформирующих систем с высокими коэффициентами уменьшения и умеренными коэффициентами аббераций.

В работах [4, 5] была рассмотрена ЗФС на базе четырех МКЛ с индивидуальными источниками питания линз, где было показано значительное преимущество такой системы по сравнению с аналогичной системой с двумя источниками питания. Рассмотренная ЗФС имела фиксированные геометрические параметры. В настоящей работе продолжено изучение магнитных квадрупольных зондоформирующих систем с дополнительными источниками питания, которые в данном случае являются свободными параметрами в процессе формирования пучка. Ниже рассмотрены ЗФС с тремя, четырьмя и пятью МКЛ с различной геометрией расположения линз вдоль оптической оси.

1. МУЛЬТИПЛЕТЫ МАГНИТНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ СО СВОБОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

На рис. 1 показана схема расположения МКЛ в мультиплете из N линз, имеющих в общем случае индивидуальные источники питания тока. Здесь определена геометрия расположения основных элементов ЗФС, где a_0 — объектное расстояние, расстояние между объектным и угловым коллиматорами; a_i — дрейфовый участок движения пучка, $i=1...N$; L_i — геометрическая длина линзы; g — рабочее расстояние, расстояние от выхода из последней линзы до поверхности мишени, $i=1...N$. Формирование пучка в такой зондовой системе условно можно разделить на три этапа.

На первом этапе происходит первичное формирование пучка с помощью прямоугольных объектного и углового коллиматоров. Конструктивно прямоугольное коллимационное окно здесь создается двумя скрещенными щелями. На этом этапе сформируется пучок с максимальным

фазовым объемом, который может быть сфокусирован мультиплетом МКЛ на поверхности мишени в квадратное пятно с заданными размерами ($d \times d$). Такой фазовый объем пучка называется аксептансом, приведенным к заданному размеру пятна, или приведенным аксептансом.

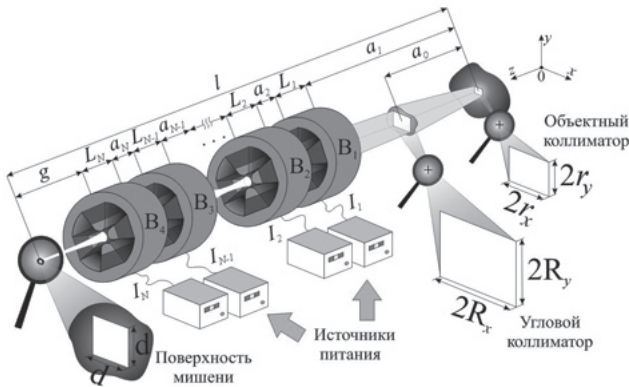


Рис. 1. Схема ЗФС с применением мультиплета МКЛ со свободными параметрами

На втором этапе первая подсистема, состоящая из k линз, обеспечивает согласование первичных фазовых характеристик пучка с ионно-оптическими характеристиками второй подсистемы из $N - k$ линз, задействованных на третьем этапе финальной фокусировки пучка. Линзы подсистемы финальной фокусировки пучка подсоединены к одному из двух источников питания, величины тока которых являются связанными параметрами, обеспечивающими стигматическую фокусировку в двух поперечных плоскостях (x, y) . В случае, если первая подсистема линз имеет независимые источники питания, создать фокусировку на мишени можно бесконечным числом способов за счет выбора значений питания всех источников, т.е. такая ЗФС является переопределенной. Поэтому величины тока первых k источников являются свободными параметрами. Так как первая подсистема МКЛ является согласующей, то естественно потребовать от нее обеспечить наилучшее согласование процесса формирования пучка, что может быть количественно выражено в максимальной величине приведенного аксептанса.

2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ЗОНДА МУЛЬТИПЛЕТАМИ МАГНИТНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ СО СВОБОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

МКЛ относятся к классу ионно-оптических элементов с сильной фокусировкой, в которых магнитное поле направлено перпендикулярно оси пучка, причем на оси линзы поле равно нулю и усиливается по мере отклонения в поперечном направлении. Таким образом, чем дальше ион отклоняется от оси в поперечном направлении x , тем большее фокусирующее действие он испытывает, и наоборот, отклоняясь в направлении y ион испытывает все большее дефокусирующее

действие. Поэтому для обеспечения общего фокусирующего действия, как правило, применяются несколько МКЛ с чередующейся полярностью полюсов в плоскостях xOz и yOz . Главной характеристикой магнитных квадрупольных ЗФС является распределение поперечного градиента магнитного поля вдоль оси системы. Задачей оптимизации процесса формирования пучка здесь является определение такого распределения градиента поля, которое позволит получить наибольшую плотность тока в зонде. Схематически модельное распределение градиента $G(z)$ показано на рис. 2, где крайнее поле в линзах представлено в виде ступенчатой функции, что является хорошим приближением в случае, когда выполнено условие $r_{ai} / L \ll 1$, где r_{ai} — радиус апертуры линзы. При этом вводится понятие эффективной длины поля линз $L_{i,eff}$. Такое модельное поле обеспечивает сохранение величины фокусного расстояния для каждой из линз с реальным продольным распределением поля.

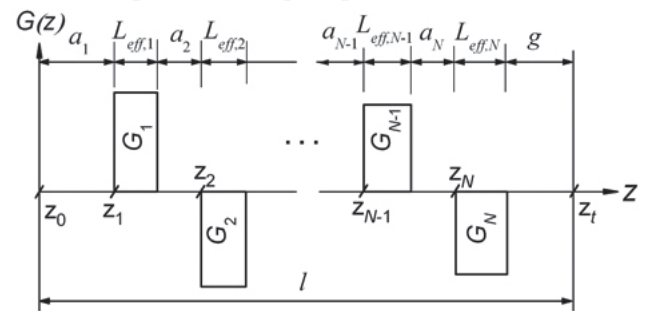


Рис. 2. Модельное распределение градиента поля мультиплета МКЛ вдоль оптической оси

Движение ионов в стационарном магнитном поле описывается нерелятивистскими траекторными дифференциальными уравнениями в виде:

$$\begin{aligned} x'' &= \frac{q}{p_0(1+\delta)}(y'B_z - B_y - x'^2 B_y + x'y'B_x)\sqrt{1+x'^2+y'^2} \\ y'' &= \frac{q}{p_0(1+\delta)}(B_x - x'B_z - x'y'B_y + y'^2 B_x)\sqrt{1+x'^2+y'^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$x(z_0) = x_0, y(z_0) = y_0, x'(z_0) = x'_0, y'(z_0) = y'_0, \quad (2)$$

где q, p_0 — заряд и средний импульс иона; $\delta = (p - p_0) / p_0$ — относительное отклонение импульса иона p от средней величины p_0 ; x, y — координаты иона, задающие его отклонение от оси z ; B_x, B_y, B_z — составляющие магнитного поля в МКЛ.

Поле в МКЛ в области прохождения пучка ионов в вакууме определяется скалярным магнитным потенциалом в виде разложения в ряд по поперечным координатам до четвертого порядка включительно:

$$\begin{aligned} w(x, y, z) &= -G(z)xy + G''(z)(x^3 y + xy^3) / 12 \\ \vec{B} &= -\mu_0 \text{grad}(w), \end{aligned} \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Такое представление позволяет учесть область краевого поля МКЛ, которое дает значительный вклад в нелинейные эффекты формирования пучка в виде коэффициентов аберраций. Модельное представление поля МКЛ с прямоугольным продольным распределением градиента (рис. 2) может быть выражено в виде:

$$G(z) = \sum_{i=1}^N G_i [\theta(z - z_i) - \theta(z - z_i - L_{i,eff})], \quad (4)$$

где $z_i, L_{i,eff}$ – координата начала границы эффективного поля и длина эффективного поля МКЛ с номером i соответственно; $\theta(z) = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ 1, & z \geq 0 \end{cases}$ – ступенчатая функция.

Решение нелинейной дифференциальной задачи (1), (2) ищется в виде нелинейной зависимости координат ионов в плоскости мишени от начальных фазовых координат в плоскости объектного коллиматора:

$$\begin{aligned} x(z_i) &= F_x(z_i) = \sum_{j=1}^{14} A_{xj}(z_i, \tau) \cdot Q_{xj} \\ y(z_i) &= F_y(z_i) = \sum_{j=1}^{14} A_{yj}(z_i, \tau) \cdot Q_{yj}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \{Q_{xj}\}_{j=1...14} &= \{x_0, x'_0, x_0 \delta, x'_0 \delta, x_0^3, x_0^2 x'_0, x_0 x_0'^2, x_0^3, x_0 y_0^2, \\ & x_0 y_0 y'_0, x_0 y_0'^2, x'_0 y_0^2, x'_0 y_0 y'_0, x'_0 y_0'^2\}; \\ \{Q_{yj}\}_{j=1...14} &= \{y_0, y'_0, y_0 \delta, y'_0 \delta, y_0^3, y_0^2 y'_0, y_0 y_0'^2, y_0^3, y_0 x_0^2, \\ & y_0 x_0 x'_0, y_0 x_0'^2, y'_0 x_0^2, y'_0 x_0 x'_0, y'_0 x_0'^2\}; \end{aligned}$$

$A_{x1} = D_x, A_{y1} = D_y$ – коэффициенты уменьшения ЗФС; $A_{x2} = f_x, A_{y2} = f_y$ – коэффициенты астигматизма; $A_{xj}, A_{yj}, j = 2, 3$ – коэффициенты хроматических аберраций; $A_{xj}, A_{yj}, j = 4, \dots, 14$ – коэффициенты геометрических аберраций третьего порядка; $\tau = \{G_1, \dots, G_N, a_1, \dots, a_N, g, L_{1,eff}, \dots, L_{N,eff}\}$ – вектор параметров, от которых зависит формирование пучка квадрупольной ЗФС.

ЗФС является стигматичной, когда поверхность мишени является гауссовой плоскостью или плоскостью изображения. Это требование накладывает условия на коэффициенты астигматизма:

$$f_x(z_i, \tau) = 0, \quad f_y(z_i, \tau) = 0. \quad (6)$$

Таким образом, уравнения (6) дают возможность однозначно определить величину градиентов полей в линзах подсистемы финальной фокусировки, подключенных к одному из двух независимых источников питания тока. Геометрические параметры $\tau_1 = \{a_1, \dots, a_N, g, L_{1,eff}, \dots, L_{N,eff}\}$ являются фиксированными, или статическими параметрами, в то время, как уже отмечалось выше, градиенты первых k линз подсистемы согласования являются свободными параметрами. Тогда формализация процесса оптимального формирования пучка в зондовой системе МКЛ со свободными параметрами, основанная на критерии максимальной величины приведенного

акцептанса, может быть представлена в виде задачи нелинейного программирования:

$$\begin{aligned} \alpha^*(\tau_1, d) &= \max_{r_x, r_y, R_x, R_y, G_1, \dots, G_k} (\alpha(\tau, d)), \\ \alpha(\tau, d) &= vol[\Omega(\tau, d)] = 16 R_x R_y r_x r_y / a_0^2, \\ f_x(\tau) &= 0, f_y(\tau) = 0, \\ G_1 &\leq G_{max}, \\ \Omega(\tau, d) &= \{(x_0, y_0, x'_0, y'_0) \mid |x_0| < r_x, |y_0| < r_y, \\ & |F_x(z_0 + a_0)| \leq R_x, |F_y(z_0 + a_0)| \leq R_y, \\ & |F_x(z_i)| \leq d/2, |F_y(z_i)| \leq d/2\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где r_x, r_y, R_x, R_y – размеры объектного и углового коллиматоров (рис. 1); G_1, \dots, G_k – градиенты полей МКЛ подсистемы согласования фазовых характеристик пучка, d – размер зонда (рис. 1); $\Omega(\tau, d)$ – фазовое множество ионов пучка, сформированного с помощью объектного и углового коллиматоров; G_{max} – максимально достижимый градиент поля в МКЛ; $F_x(z), F_y(z)$ – преобразование фазовых координат ионов в виде (5).

3. АНАЛИЗ ФОКУСИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ЗОНДОВЫХ СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Геометрия расположения линз в ЗФС, а также их количество относятся к статическим параметрам. Эти параметры могут изменяться на стадии анализа фокусирующих свойств систем формирования ионных пучков. После того как ЗФС реализована в экспериментальной установке, менять геометрию системы и количество линз не представляется возможным. Поэтому важным является проведение такого анализа на стадии разработки ЗФС, в которых применяются мультиплеты МКЛ с свободными параметрами. В данной работе рассмотрены ЗФС с количеством линз $N = 3, 4, 5$, в которых согласующая подсистема и подсистема финальной фокусировки имеют компактное расположение линз. В триплете ($N = 3$) вторая и третья линзы являются линзами подсистемы финальной фокусировки и расположены на минимальном расстоянии $a_3 = 0,01$ м, а положение первой линзы варьировалось в пределах $1,11 \text{ м} \leq a_1 \leq 3,71 \text{ м}$. Линзы подключены к трем независимым источникам питания таким образом, что реализуется распределение градиента в плоскости $xOz\{\pm G_1, -G_2, +G_3\}$. В квадруплете ($N = 4$) третья и четвертая линзы входят в подсистему финальной фокусировки, а согласующая подсистема состоит из первой и второй линз. В каждой из подсистем линзы в дублетах расположены на расстоянии $a_2 = a_4 = 0,01$ м. Положение первого дублета варьировалось в пределах $1,08 \text{ м} \leq a_1 \leq 3,63 \text{ м}$. Линзы в квадруплете подключены к четырем независимым источникам питания так, что реализуется распределение градиента в плоскости $xOz\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, -G_4\}$. В пентуплете ($N = 5$) подсистема финальной фокусировки состоит из трех последних линз,

расположенных на минимальном расстоянии, а первые две линзы входят в согласующую подсистему, таким образом $a_2 = a_4 = a_5 = 0,01$ м. В такой ЗФС имеет свободу перемещения вдоль оси дублет согласующей подсистемы и $1,06 \text{ м} \leq a_1 \leq 3,55 \text{ м}$. Линзы в пентуплете подключены к четырем независимым источникам питания так, что реализуется распределение градиента в плоскости $xOz\{\pm G_1, \pm G_2, +G_3, +G_3, -G_4\}$. Для всех рассмотренных ЗФС рабочее расстояние изменялось в пределах $0,06 \text{ м} \leq g \leq 0,18 \text{ м}$. Длина системы была фиксирована $l = \sum_{j=1}^N a_j + g = 4 \text{ м}$, максимальный относительный разброс по импульсу частиц в пучке $\delta_{\max} = 10^{-5}$, максимальный градиент поля в линзах $G_{\max} = 0,5 \text{ Тл/см}$.

Таким образом, путем последовательно анализа решена оптимизационная задача (7) формирования пучка ионов квадрупольными ЗФС для различных значений геометрических параметров a_1 и g в указанных выше пределах. Для решения применен модифицированный метод градиентного спуска, адаптированный для задачи в виде (7). Точность определения приведенного акцептанса составляла 5%, что связано с разумными затратами на время вычислений. Анализ полученных результатов, показанных на рис. 3, дает основание утверждать, что по мере увеличения расстояния между линзами двух подсистем формирования пучка величина максимального приведенного акцептанса для трех типов мультиплетов слабо зависит от параметра a_1 , положения линз согласующей подсистемы вдоль оптической оси. Однако увеличение количества линз в ЗФС приводит к росту приведенного акцептанса (рис. 3). Здесь стоит отметить, что отличие в величине приведенного акцептанса у квадруплета и пентуплета не столь значимое, чем у квадруплета и триплета. Это говорит о целесообразности увеличения линз в системе. Из рис. 4 видно, что системы с меньшим рабочим расстоянием g также обладают более высоким приведенным акцептансом.

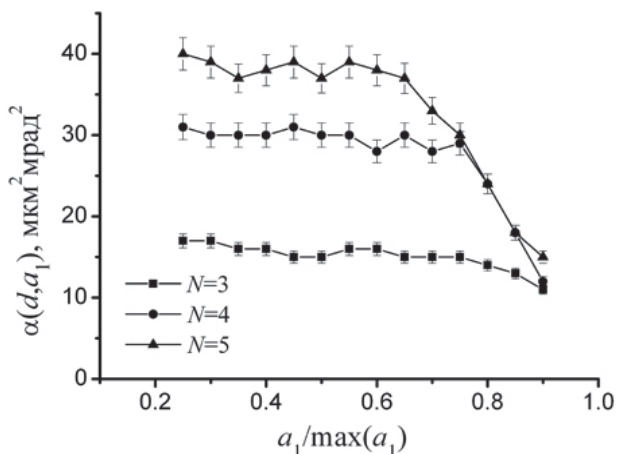


Рис. 3. Зависимость приведенного акцептанса от параметра a_1 для трех мультиплетов, $g = 0,06 \text{ м}$, $d = 1 \text{ мкм}$

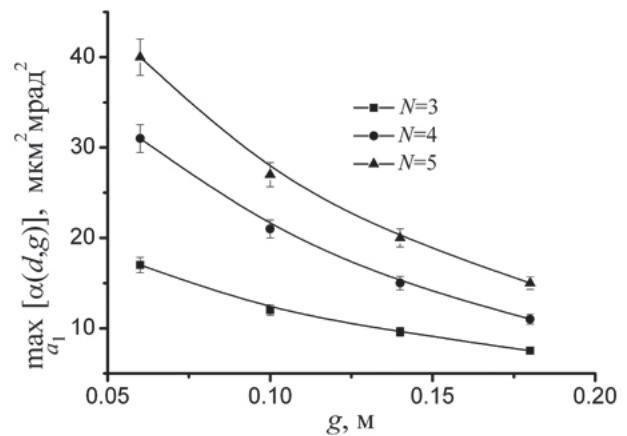


Рис. 4. Зависимость максимального приведенного акцептанса от параметра g для трех мультиплетов, $d = 1 \text{ мкм}$

ВЫВОДЫ

В результате решения оптимизационной задачи формирования ионного пучка в зондовых системах с применением мультиплетов магнитных квадрупольных линз с дополнительными источниками питания в виде свободных параметров показано, что приведенный акцептанс слабо зависит от геометрического положения линз согласующей подсистемы для всех трех рассмотренных мультиплетов для $a_1 / \max(a_1) > 0,65$. По мере увеличения количества линз в ЗФС наблюдается рост приведенного акцептанса, однако для пентуплета по отношению к квадруплету этот рост незначителен. Для каждого из рассмотренных мультиплетов уменьшение рабочего расстояния приводит к увеличению приведенного акцептанса.

Литература

- [1] Ryan C.G. PIXE and the nuclear microprobe: Tools for quantitative imaging of complex natural materials // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2011. – Vol. 269. – P. 2151-2162.
- [2] Погребняк А.Д. Применение микро- и нанозондов для анализа малоразмерных 3D материалов, наносистем и нанобъектов / А.Д. Погребняк, А.Г. Пономарев, А.П. Шпак, Ю.А. Куницкий // УФН. – 2012. – Т. 182. – № 3. – С. 287-321.
- [3] Watt F. Proton Beam Writing / F. Watt, M.V.H. Breese, A. Bettiol, J.A. van Kan // Materials Today. – 2007. – Vol. 10, No. 6. – P. 20-29.
- [4] Пономарев А.Г. Оптимизация квадрупольной зондоформирующей системы с индивидуальными источниками питания линз / А.Г. Пономарев, Г.С. Воробьев, А.А. Пономарева // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2010. – Т. 53. – №2. – С. 58-64.
- [5] Ponomarova A.A. One-stage forming systems with quadrupole lenses excited by individual power supplies / A.A. Ponomarova, K.I. Melnik, G.S. Vorobjov, A.G. Ponomarev // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2011. – Vol. 269. – P. 2202-2205.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 0112U001379.

Поступила в редколлегию 7.12.2012



Пономарева Анна Александровна, аспирант Сумского государственного университета. Область научных интересов: разработка новых типов магнитных квадрупольных линз и методов их диагностики; проведение компьютерного моделирования ионно-оптических систем формирования и фокусировки пучков заряженных частиц; проведение исследований нелинейной динамики ионных пучков с целью создания компактного ядерного микрозонда нового поколения.

лежить до задачі нелінійного програмування. В якості критерію оптимальності обрана величина приведенного аксептанса, яка пропорційна щільності току пучка на мішені. Показано, що доцільним є обмеження кількості лінз до чотирьох для розглянутої зондоформуючої системи.

Ключові слова: мікрозонд, іонний пучок, мультиплет магнітних квадрупольних лінз, приведений аксептанс.

Лл. 04. Бібліогр.: 05 найм.

UDS 537.533.3

Focusing properties optimization of probe systems of forming ion beams by multiplets of magnetic quadrupole lenses with free parameters / A.A. Ponomaryova // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 4. – P. 522–526.

Geometric parameters and the number of magnetic quadrupole lenses in a probe forming system with free parameters are optimized. Conditionally a lens system is divided into a coordination subsystem and a final focusing subsystem, where the lenses of the first subsystem are powered by independent sources called free parameters. The second subsystem is powered by two independent sources which are related parameters that determine the condition of a stigmatic focusing beam on the target surface. The problem of optimizing the process of ion beam formation in quadrupole probe systems with free parameters has been formulated and solved. The said problem is a nonlinear programming problem. As benchmarks the value of the reduced acceptance has been selected which is proportional to the current density of the beam on the target. It is shown that it is expedient to limit the number of lenses to four for the considered probe forming system.

Keywords: microprobe, ion beam, multiplet of magnetic quadrupole lenses, reduced acceptance.

Fig. 04. Ref.: 05 items.

УДК 537.533.3

Оптимізація фокусуєчих властивостей зондових систем формування іонних пучків мультиплетами магнітних квадрупольних лінз із вільними параметрами / Г.О. Пономарьова // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2013. – Том 11. – № 4. – С. 522–526.

Оптимізовано геометричні параметри й кількість магнітних квадрупольних лінз в зондоформуючій системі з вільними параметрами. Умовно лінзова система розбита на підсистему узгодження та підсистему фінального фокусування, де лінзи першої підсистеми мають живлення від незалежних джерел, котрі являють собою вільні параметри. Живлення другої підсистеми здійснюється від двох незалежних джерел, які є зв'язаними параметрами, визначаючими умову створення стигматичного фокусування на поверхні мішені. Сформульована та вирішена задача оптимізації процесу формування пучка іонів у квадрупольних зондових системах з вільними параметрами, яка на-