

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗОНДОФОРМИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЯДЕРНОГО СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОЗОНДА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ «СОКОЛ»

А.Г. Пономарев, В.А. Ребров, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторижко
Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина
E-mail: rebrov@ipflab.sumy.ua*

Рассмотрены принципы оптимизации геометрических и физических параметров зондоформирующей системы ядерного микрозонда. Критерием оптимальности системы была выбрана величина тока пучка, который может быть сфокусирован в пятно на мишени заданных размеров. Результаты оптимизационных расчетов сравнивались с экспериментальными данными, полученными за счет детектирования вторичной электронной эмиссии при сканировании пучком калиброванной медной сетки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные достижения науки в области микроанализа и высокий уровень технологий в этой сфере деятельности позволили найти решение многих макрозадач при помощи изучения законов микромира. Именно элементный состав вещества и расположение в нем микроэлементов в совокупности определяют его физико-химические свойства. Среди широкого многообразия методов, позволяющих определять распределение элементов в приповерхностных слоях исследуемых образцов, методы, использующие сфокусированные пучки заряженных частиц, обладают рядом преимуществ. И, в первую очередь, это связано с возможностью проведения неразрушающего количественного микроанализа с высоким пространственным разрешением. В последние несколько десятилетий получили развитие методы микроанализа с применением ядерных сканирующих микрозондов (ЯСМЗ) [1]. Основной принцип работы микрозонда состоит в том, что ускоренный пучок легких ионов до энергий нескольких мегаэлектронвольт (с помощью, как правило, электростатических ускорителей) фокусируется на поверхности исследуемого образца в пятно с размерами около одного микрометра. В результате электромагнитного сканирования пучка и регистрации продуктов взаимодействия частиц пучка с атомами образца создается возможность в определении как элементного состава исследуемого вещества, так и карты расположения элементов. В отличие от растрового электронного микроскопа в ЯСМЗ не существует принципиальных физических ограничений на пространственное разрешение, которое связано с величиной размеров пятна пучка вследствие малого расширения его при прохождении в веществе. Напротив, как известно, разрешающая способность растрового электронного микроскопа определяется характерной грушевидной формой с микрометрическими размерами (в зависимости от энергии пучка), что связано с сильным рассеянием электронов в веществе и практически не зависит от величины пятна пучка на поверхности образца.

В Институте прикладной физики Национальной

академии наук Украины (ИПФ НАНУ), в процессе выполнения проектов в рамках государственной программы фундаментальных и прикладных исследований для потребностей атомной энергетики Украины на базе электростатического ускорителя «Сокол» [2] создан ядерный сканирующий микрозонд с интегрированной зондоформирующей системой [3]. Для целей обеспечения оптимальных параметров микрозонда с точки зрения получения минимальных размеров пятна на мишени при токе пучка около 100 пА с учетом параметров ускорителя были проведены оптимизационные расчеты зондоформирующей системы (ЗФС). Основой таких расчетов послужили проведенные ранее в ИПФ фундаментальные исследования путей увеличения пространственного разрешения ЗФС. Проведено исследование предельной разрешающей способности зондоформирующих систем на базе параметрических мультиплетов магнитных квадрупольных линз [4], где показано, что увеличение линз в системе не приводит к существенному увеличению разрешающей способности. Поэтому выбор четырех линз в ЗФС является вполне обоснованным. Проведены исследования влияния паразитных мультипольных компонент поля магнитных квадрупольных линз на разрешающую способность ЗФС с учетом геометрических и хроматических aberrаций до 3-го порядка включительно. Определены предельно допустимые уровни секступольных и октупольных паразитных компонент поля, вызванных несовершенствами изготовления линз [5]. Решена обратная задача по определению допусков на изготовление магнитопроводов линз, когда нарушение геометрии квадрупольной симметрии приводит к уменьшению разрешающей способности зондоформирующих систем в допустимых пределах [6]. В настоящей работе изложены принципы оптимизации параметров ЗФС с целью обеспечения наилучшего пространственного разрешения ядерного микрозонда и проведено сравнение экспериментальных значений параметров пучка на мишени с расчетными данными.

2. ИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОНДОФОРМИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Мы в дальнейшем будем рассматривать ЗФС, состоящие из магнитных квадрупольных линз, оси которых совмещены с оптической осью, связанной с пучком. При этом распределение магнитного поля в области прохождения пучка может быть представлено магнитным скалярным потенциалом $w(x,y,z)$ в виде

$$w(x,y,z) = 2W_2(z)xy + U_3(z)x^3 + 3W_3(z)x^2y - 3U_3(z)xy^2 - W_3(z)y^3 + U_4(z)x^4 + (4W_4(z) - W_2''(z)/6)x^3y - 6U_4(z)x^2y^2 - (4W_4(z) + W_2''(z)/6)xy^3 + U_4(z)y^4 + \dots, \quad (1)$$

где распределения вдоль оси z основной квадрупольной компоненты W_2 , секстипольных основной и вращательной W_3, U_3 и октупольных основной и вращательной W_4, U_4 паразитных компонент соответственно схематически показаны на Рис. 1.

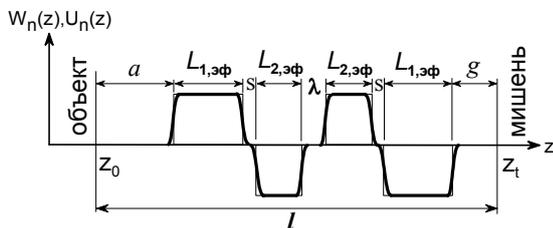


Рис. 1. Схематическое представление распределения мультипольных компонент магнитного поля вдоль оси ЗФС, $n=2,3,4$

Как видно из Рис. 1, распределение магнитного поля вдоль оси ЗФС зависит от ряда параметров, которые связаны как с величиной протяженности поля магнитных квадрупольных линз, так и с их расположением вдоль оптического тракта. Здесь рассмотрена система, состоящая из квадруплета магнитных квадрупольных линз с вариантом запитывания линз от двух независимых источников питания, которая представляет собой систему, аналогичную аксиально-симметричной линзе, впервые опубликованная в [7]. В такой ЗФС первая и четвертая линзы запитаны от одного источника, а вторая и третья линзы от второго источника, причем каждая из соседних линз имеет инверсное направление тока в возбуждающих катушках. Параметрами ЗФС являются: a – объектное расстояние (расстояние от объектного коллиматора до эффективной границы поля первой линзы); s, λ – расстояния между эффективными границами поля линз; g – рабочее расстояние (расстояние между мишенью и эффективной границей поля последней линзы); l – длина ЗФС; $L_{i,эф}$ – эффективные длины поля линз ($i=1,2$); $W_{2,i}$ – величина запитывания линз ($i=1,2$), обеспечивающих стигматическую фокусировку пучка на мишени; $W_{n,i}, U_{n,i}$ – величины предельно допустимых паразитных мультипольных компонент поля ($i=1,2; n=3,4$).

Рассматриваемые ЗФС являются ионно-оптическими системами с прямолинейной осевой траекторией, поэтому траекторные уравнения движения заряженных частиц пучка имеют вид:

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

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

с начальными условиями

$$x(z_0)=x_0, x'(z_0)=x'_0, y(z_0)=y_0, y'(z_0)=y'_0, \quad (3)$$

где q – заряд частицы; p_0 – средний импульс частиц в пучке; δ – отклонение импульса частицы от средней величины; B_x, B_y, B_z – составляющие магнитного поля, которые определяются скалярным магнитным потенциалом (1); x, y – координаты частицы, задающие ее отклонение от оси z .

Уравнения (2) являются нелинейными относительно поперечных координат x, y , где отсутствует учет сил пространственного заряда пучка вследствие малого тока (~ 100 пА) и релятивистского эффекта, так как энергия ионов находится на уровне нескольких мегаэлектронвольт. Приближенное решение задачи Коши (2),(3) ищется как преобразование исходных фазовых координат (x_0, x'_0, y_0, y'_0) из плоскости объекта (z_0) в плоскость мишени (z_t) в виде

$$x_t = x_0 / D_x + C_{px} x'_0 \delta + \sum_{\substack{i,j \\ i+j=2}} \langle x / x'_0 y'_0 \rangle x'_0 y'_0 + \sum_{\substack{i,j \\ i+j=3}} \langle x / x'_0 y'_0 \rangle x'_0 y'_0, \quad (4)$$

$$y_t = y_0 / D_y + C_{py} y'_0 \delta + \sum_{\substack{i,j \\ i+j=2}} \langle y / x'_0 y'_0 \rangle x'_0 y'_0 + \sum_{\substack{i,j \\ i+j=3}} \langle y / x'_0 y'_0 \rangle x'_0 y'_0,$$

где $D_{x(y)}$ – коэффициенты уменьшения в x - и y -направлениях; $C_{px(y)}$ – коэффициенты хроматической аберрации;

$$\langle x / x'_0 y'_0 \rangle, \langle y / x'_0 y'_0 \rangle -$$

коэффициенты сферической аберрации; при $i+j=2$ сферическая аберрация второго порядка, вызванная паразитными секстипольными компонентами магнитных квадрупольных линз; при $i+j=3$ сферическая аберрация третьего порядка, вызванная паразитными октупольными компонентами и краевыми эффектами квадрупольной компоненты магнитных квадрупольных линз.

Коэффициенты уменьшения и аберрации определяют ионно-оптические свойства ЗФС. Для их нахождения применялся метод матрицантов, изложенный в [8]. Несложно видеть, что ионно-оптические свойства зависят от параметров ЗФС, определенных выше. Поэтому выбор оптимальных параметров должен удовлетворять некоторому критерию, отвечающему физическим принципам зондоформирования.

3. КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЗФС

Создание ЗФС, обладающих относительно большим пространственным разрешением, основано на поиске систем с большими коэффициентами уменьшения при низких аберрациях, так как исходя из вида соотношений (4) первые приводят к уменьшению пятна на мишени, а вторые – к его увеличению. Но во всех ЗФС рост коэффициентов

уменьшения ведет к значительному увеличению aberrаций, поэтому при оптимальном соотношении коэффициентов уменьшения и aberrаций в конкретно выбранной системе достигается возможность создания на мишени пятна с высокой концентрацией ионов. Критерий качества ЗФС вытекает из требований аналитических методик, применяемых для анализа вещества, когда информация поступает из акта взаимодействия частиц пучка с атомами мишени. Число таких событий находится в прямой зависимости от количества частиц, попадающих в единицу времени в пятно на мишени. Пятно при этом должно иметь минимальные размеры для определения карты распределения элементов в исследуемом веществе. Поэтому критерием качества ЗФС является величина тока на мишени в пятне заданных размеров. Ток пучка I связан с нормализованной яркостью b и нормализованным эмиттансом пучка ϵ соотношением $I=b \cdot \epsilon$. Из того, что на входе в зондоформирующую систему величина b фиксированная, следует $\max(I) \sim \max(\epsilon) = A$. Но максимальный эмиттанс пучка, который ЗФС может сфокусировать в пятно заданных размеров, равен аксептансу системы A . Аксептанс определяется параметрами коллиматоров:

$$A = 16r_x r_y R_x R_y / a^2, \quad (5)$$

где $2r_x, 2r_y$ – размеры прямоугольного объектного коллиматора; $2R_x, 2R_y$ – размеры прямоугольного углового коллиматора; a – расстояние между коллиматорами (объектное расстояние).

Согласно (4) одни и те же размеры пятна на мишени для данной зондоформирующей системы можно получить различными комбинациями объектного и углового коллиматоров. Так, уменьшая размеры объектного коллиматора, пятно на мишени останется неизменным за счет aberrационного расширения пучка при увеличении углового коллиматора. На основании выше сказанного для каждой зондоформирующей системы существует оптимальный набор объектного и углового коллиматоров, которые обеспечивают максимальный ток пучка при заданных размерах пятна на мишени. Стоит заметить, что размеры коллиматоров и, следовательно, аксептанс зависят от ионно-оптических свойств ЗФС, которые, как уже упоминалось, имеют зависимость от параметров ЗФС.

4. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗФС

На основании проведенных исследований [9] можно утверждать, что для ускорителей с разбросом пучка по импульсу на уровне $\delta \sim 5 \cdot 10^{-4}$ разрешающая способность ЗФС практически не зависит от длины системы в пределах $2 \text{ м} < l < 9 \text{ м}$, при этом эти системы не в состоянии обеспечить режим с субмикронным разрешением при токах $I \sim 100 \text{ пА}$ для ряда аналитических методик. Это объясняется тем, что хроматические aberrации приведут к значительному уменьшению размеров коллиматоров для обеспечения субмикронных размеров пучка на мишени и, следовательно, к снижению тока.

Поэтому нет необходимости выбирать ЗФС с высокими коэффициентами уменьшения ($D \approx 100$), которые имеют длинные системы с $l = 7 \dots 9 \text{ м}$. Исходя из вышеизложенного, за базовую длину была выбрана длина ЗФС $l \approx 4.0 \text{ м}$. При заданной базовой длине необходимо было провести оптимизацию параметров ЗФС $a, s, g, L_{1, \text{эф}}, W_{1,2}, W_{n,i}, U_{n,i}$ ($i=1,2; n=3,4$) (см. Рис.1) с точки зрения обеспечения максимальной величины тока при заданных размерах пятна на мишени с учетом конструктивных ограничений.

В работе [5] показано, что для ЗФС на базе квадруплета магнитных квадруплей максимально допустимые относительные уровни паразитных компонент поля линз составляют $W_3/W_2 = U_3/W_2 = 0.00375 (1/\text{см})$ и $W_4/W_2 = U_4/W_2 = 0.00538 (1/\text{см}^2)$. Результаты анализа влияния точности позиционирования полюсных наконечников как жесткого целого на величину паразитных компонент поля для различных значений радиуса апертуры показывают, что в магнитных квадрупольных линзах с радиусом апертуры $r_a = 0.65 \text{ см}$ с точностью позиционирования полюсных наконечников $< \pm 5 \text{ мкм}$ не будут превышены предельно допустимые уровни паразитных компонент поля [6]. Эта точность позиционирования определяет технологический допуск на точность изготовления магнитопроводов линз.

Величина рабочего расстояния ограничена размерами сканирующей системы, когда она расположена после последней линзы. В нашем случае в постлинзовом расположении сканирующей системы рабочее расстояние $g \geq 22 \text{ см}$.

Известно, что оптическая сила магнитной квадрупольной линзы находится в прямой зависимости от ее длины и градиента поля на продольной оси. Тот факт, что короткофокусные системы обладают большим пространственным разрешением, определяет стремление выбирать длину линзы меньшую, на сколько это возможно. На основании предварительных расчетов было определено, что магнитная индукция в центральной части полюсного наконечника может достигать величины 0.42 Тл , при этом в точках с наименьшим расстоянием между полюсами еще нет насыщения материала магнитопровода. При выбранном радиусе апертуры максимальный градиент поля составляет 0.64 Тл/см . Для обеспечения фокусировки пучков ионов H^+, He^+ с энергией 2 МэВ при рабочем расстоянии $g = 22 \text{ см}$ длины линз составляют $L_{1, \text{эф}} = 7.141 \text{ см}$, $L_{2, \text{эф}} = 5.068 \text{ см}$. Выбор объектного расстояния осуществлялся на основе величины максимального аксептанса ЗФС при изменении объектного расстояния a с применением численного кода MAXVEMIT, который реализован в соответствии с алгоритмом, изложенным в [10].

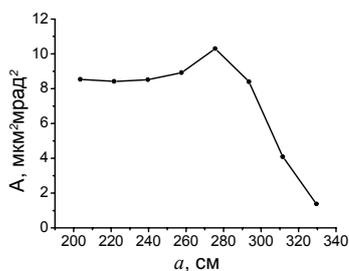


Рис.2. Зависимость аксептанса A от объектного расстояния a для ЗФС, обеспечивающей фокусировку пучка на мишени в квадратное пятно с размерами 2.2×2.2 мкм²

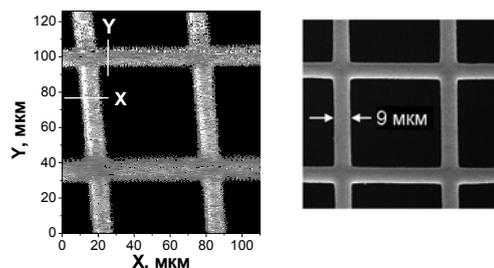
На Рис.2 показана зависимость аксептанса от объектного расстояния с учетом всех aberrаций, представленных в (4). Оптимальные параметры ЗФС приведены в таблице, где также даны размеры объектного и углового коллиматоров, которые обеспечивают максимальный аксептанс ЗФС при фокусировке пучка в пятно с размерами 2.2×2.2 мкм².

Оптимизированные параметры ЗФС ядерного сканирующего микронзонда на базе электростатического ускорителя „СОКОЛ” ИПФ НАНУ

Длина системы, l [см]	405.8
Эффективные длины линз: $L_{1,эф}$ [см]	7.141
$L_{2,эф}$ [см]	5.068
Расстояние между линзами, s [см]	3.94
Радиус апертуры линз, r_a [см]	0.65
Рабочее расстояние, g [см]	22.0
Объектное расстояние, a [см]	250.4
Максимальная магнитная индукция на полюсе, $E=2$ МэВ,	
H^+ , $B_{\text{макс}}$ [Тл]	0.203
H_2^+ , $B_{\text{макс}}$ [Тл]	0.288
He^+ , $B_{\text{макс}}$ [Тл]	0.406
Коэффициенты уменьшения: $D_x=D_y$	23.5
Хроматические aberrации, мкм/мрад/%	
C_{px}	-526
C_{py}	-160
Сферические aberrации, мкм/мрад ³	
$\langle x/x'^3 \rangle$	932
$\langle x/x'y'^2 \rangle$	264
$\langle y/y'^3 \rangle$	38
$\langle y/y'^2x' \rangle$	264
Размеры коллиматоров для пятна на мишени 2.2×2.2 мкм ²	
Объектный, $2r_x; 2r_y$, мкм	32; 32
Угловой, $2R_x; 2R_y$, мкм	132; 362
Соответствующий аксептанс, мкм ² ·мрад ²	12.7

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗФС

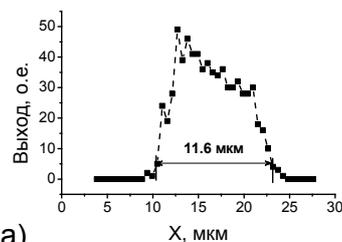
Для определения реальных размеров пучка на мишени были проведены эксперименты по измерению выхода вторичной электронной эмиссии при сканировании пучком калиброванной медной сетки с периодом 400 ячеек/дюйм.



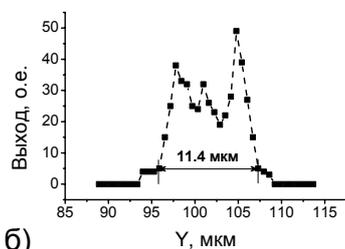
а) б)

Рис.3. Изображение во вторичных электронах калиброванной медной сетки 400 ячеек/дюйм: а) ядерный сканирующий микронзонд ИПФ НАНУ; б) растровый электронный микроскоп РЭММА-106

На Рис.3,а показано изображение одной полной ячейки такой сетки во вторичных электронах, индуцированных пучком протонов с энергией 1 МэВ на ядерном микронзонде ИПФ НАНУ. Размеры коллиматоров были установлены в соответствии с размерами, приведенными в таблице. Для сравнения, на Рис.3,б приведено изображение такой же сетки, полученное при помощи растрового электронного микроскопа РЭММА-106.



а)



б)

Рис.4. Выход вторичной электронной эмиссии вдоль линий сканирования протонным пучком: а) x -направление; б) y -направление.

Указан размер на 10% максимума выхода

Обработка этого изображения дает размеры перемычки сетки 9 мкм. Выход вторичной электронной эмиссии вдоль линий сканирования x, y , показанных на Рис.3,а, приведен на Рис.4. Здесь можно видеть, что размер перемычки сетки на высоте 10% от максимума выхода составляет 11,6 мкм в x -направлении и 11,4 мкм в y -направлении. С учетом реального размера перемычки (9 мкм) размеры пучка у основания (на 10% максимума) составляют 2,6 и 2,4 мкм в x - и y -направлениях соответственно, что в сравнении с расчетными данными (см. таблицу) дает завышенный результат на 18%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПФ НАН Украины были проведены наиболее полные оптимизационные расчеты параметров зондоформирующей системы на базе квадруплета магнитных квадрупольных линз с учетом характеристик электростатического ускорителя «СОКОЛ». Критерием качества системы являлась максимальная величина тока пучка, который может быть сфокусирован в пятно на мишени с заданными размерами. Было показано, что максимальная величина тока пучка пропорциональна величине аксептанса ЗФС. Были определены ионно-оптические свойства системы, которые соответствуют оптимизированным геометрическим и физическим параметрам ЗФС. Полученные экспериментальные размеры пучка на мишени в соответствии с расчетными оптимальными размерами коллиматоров составили $2.6 \times 2.4 \text{ мкм}^2$ при величине тока около 100 пА, что отличается от расчетных значений размеров пучка не более чем на 18%.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Breese, J. Damieson, P. King. *Material Analysis Using a Nuclear Microprobe*. New York: "Wiley". 1996, p.367.
2. Л.П. Батвинов, А.Д. Вергунов, Л.С. Глазунов и др. Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа (предварительные испытания) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Техника физического эксперимента»*. 1985, в.1(22) с.26-28.
3. V.E. Storizhko, A.G. Ponomarev, V.A. Rebrov et al. The Sumy scanning nuclear microprobe: design features and first tests // *Nucl. Instr. and Meth.* 2007, v.B260, p.49-54.
4. A.G. Ponomarev, K.I. Melnik, V.I. Miroshnichenko et al. Parametric multiplets of magnetic quadrupole lenses: application prospects for probe-forming systems of nuclear microprobe // *Nucl. Instr. and Meth.* 2005, v.B231, p.86-93.
5. A.G. Ponomarev, K.I. Melnik, V.I. Miroshnichenko et al. Resolution limit of probe-forming systems with magnetic quadrupole lens triplets and quadruplets // *Nucl. Instr. and Meth.* 2003, v.B201, p.637-644.
6. K.I. Melnik, A.G. Ponomarev. Permissible technological limitation of quadrupole lenses used in parameter multiplets for ion microprobe forming // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2003, №4, с.301-304.
7. А.Д. Дымников, С.Я. Явор. Четыре квадрупольные линзы как аналог аксиально-симметричной системы // *ЖТФ*. 1963, т.33, в.7, с.851-858.
8. А.Д. Дымников, Г.М. Осетинский. Система формирования протонных пучков микронных размеров // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 1989, т.20, в.3, с.694-733.
9. V.A. Brazhnik, V.I. Miroshnichenko, A.G. Ponomarev et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* 2001, v.B174, p.385-391.
10. A.G. Ponomarev, V.I. Miroshnichenko, V.E. Storizhko. Optimum collimator shape and maximum emittance for submicron focusing of ion beams. Determination of the probe forming system resolution limit // *Nucl. Instr. and Meth.* 2003, v.A586/1-2, p.20-25.

Статья поступила в редакцию 19.05.2008 г.

THE PARAMETER OPTIMIZATION OF PROBE FORMING SYSTEM OF SCANNING NUCLEAR MICROPROBE ON THE BASE OF ELECTROSTATIC ACCELERATOR "SOKOL"

A.G. Ponomarev, V.A. Rebrov, V.I. Miroshnichenko, V.E. Storizhko

Optimization principles for geometric and physical parameters of probe forming system of nuclear microprobe were considered. Current value of beam which can be focused on the defined target spot was chosen as a criterion of optimum. The optimizing calculation results were compared with experimental data obtained by detecting of the secondary electron emission when the calibrated copper grid was being scanned by the beam.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗОНДОФОРМУЮЧОЇ СИСТЕМИ ЯДЕРНОГО СКАНУЮЧОГО МІКРОЗОНДУ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПРИСКОРЮВАЧА «СОКІЛ»

О.Г. Пономарьов, В.А. Ребров, В.І. Мирошніченко, В.Ю. Сторіжко

Розглянуто принципи оптимізації геометричних та фізичних параметрів зондоформуючої системи ядерного мікрозонду. За критерій оптимальності системи було прийняте значення струму пучка, який може бути сфокусований у пляму на мішені певних розмірів. Значення оптимізаційних розрахунків порівнювалися з експериментальними даними, отриманими за рахунок детектування вторинної електронної емісії при скануванні пучком каліброваної мідної сітки.