

01;10

## Оптимизация зондоформирующей системы ядерного сканирующего микрозонда на базе электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10

© С.Н. Абрамович,<sup>1</sup> Н.В. Завьялов,<sup>1</sup> А.Г. Звенигородский,<sup>1</sup> И.Г. Игнатьев,<sup>2</sup>  
Д.В. Магилин,<sup>2</sup> К.И. Мельник,<sup>2</sup> А.Г. Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной и радиационной физики, Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 207190 Саров, Нижегородская область, Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной физики НАН Украины, 40030 Сумы, Украина  
e-mail: ipfmail@ipfcentr.sumy.ua

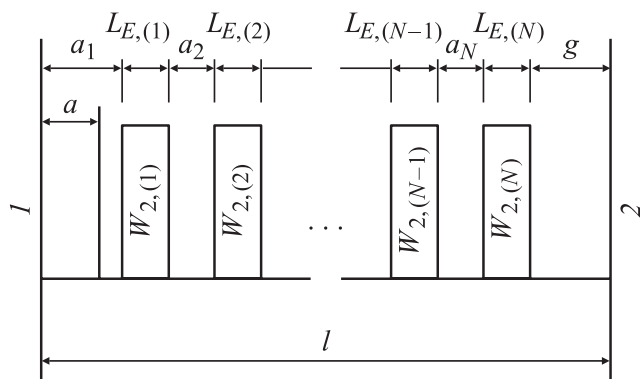
(Поступило в Редакцию 31 марта 2004 г. В окончательной редакции 30 июня 2004 г.)

Проведены оптимизационные расчеты зондоформирующей системы ядерного сканирующего микрозонда на базе параметрических мультиплетов магнитных квадрупольных линз с целью создания ионного зонда с энергией несколько MeV с микрометровыми размерами пятна на мишени при токе  $I \sim 100$  pA. Определено влияние различных геометрических и физических параметров на ионно-оптические свойства рассмотренных зондоформирующих систем. Оптимизация проводилась за счет варьирования параметров, задающих параметрический мультиплет, на основе критерия качества, который определяется величиной тока пучка при заданных размерах пятна на мишени. В расчет принимались параметры пучка на выходе из электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10 ВНИИЭФ: максимальная энергия, нормализованная яркость пучка, условия его транспортировки, хроматическая однородность, характеризующаяся разбросом частиц пучка по энергии. Учтены также паразитные компоненты поля магнитных квадрупольных линз, обусловленные нарушением квадрупольной симметрии вследствие их технологических и физических несовершенств при изготовлении.

### Введение

Электростатические ускорители (ЭСУ), разработанные ранее для задач экспериментальной ядерной физики, по-прежнему являются привлекательными для приложений в различных областях науки и в технологиях. В первую очередь это связано с такими особенностями ЭСУ, как высокая монохроматичность пучка и возможность плавно изменять энергию. Одним из приложений является создание на базе ЭСУ ядерного сканирующего микрозонда (ЯСМЗ) для проведения исследования структуры и элементного состава вещества различного происхождения, включая и биологические объекты с применением таких хорошо разработанных ядерно-физических методов, как PIXE (характеристическое рентгеновское излучение, индуцированное ионами), NRA (анализ с помощью ядерных реакций), RBS (обратное резерфордское рассеяние) и др. ЯСМЗ находит в настоящее время широкое применение и в технологических целях при создании комплектов для микромашин [1] и прецизионной ионной имплантации [2]. Потребность создания зонда с использованием сфокусированных ионных пучков с энергией несколько MeV с микрометровыми размерами на мишени поставила задачу поиска зондоформирующих систем (ЗФС), способных обеспечить требуемые параметры. Высокая энергия пучка делает практически непригодным накопленный в электронной микроскопии опыт, где применяются фокусирующие элементы с акси-

альной симметрией поля. В большинстве современных ядерных микрозондов в качестве основного фокусирующего элемента используется магнитная квадрупольная линза. Согласно [3], на практике релятивистские эффекты должны приниматься во внимание при скорости частицы  $v$ , когда  $v/c > 0.2$ , где  $c$  — скорость света. Для протонов с энергией 14 MeV отношение  $v/c \approx 0.17$ , поэтому нами рассматривается нерелятивистское приближение движения заряженных частиц. Оптическая сила магнитной квадрупольной линзы определяется безразмерным возбуждением  $\kappa$  полюсного наконечника с гиперболической формой  $\kappa = L_E \sqrt{W_2 \sqrt{2q/mV}}$ , где  $W_2$  — квадрупольная компонента, характеризующаяся градиентом поля в поперечном к оптической оси направлении;  $L_E$  — эффективная длина поля линзы;  $m, q$  — масса и заряд иона соответственно;  $V$  — разность потенциалов ускоряющего промежутка. Оптическую силу квадрупольной линзы в отличие от линз с аксиальной симметрией можно увеличить не только за счет увеличения градиента поля, но и за счет увеличения эффективной длины поля линз, поэтому здесь принципиально нет ограничений на энергию пучка. В силу того что квадруполи обладают фокусирующими свойствами только в одном поперечном направлении, для создания стигматической фокусировки пучка на мишени применяются мультиплетные системы из нескольких линз. Схематически расположение квадруполей в мультиплете представлено на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема расположения квадрупольных линз в мультиплете: 1 — объект, 2 — мишень.

Собственно ЗФС состоит из компонентов: объектного и углового коллиматоров, фокусирующих элементов и мишени. Местоположение каждого из них вдоль оптической оси задается геометрическими параметрами  $a, g, a_i, l, L_{E,(i)}$ , где  $a$  — объектное расстояние, расстояние от объектного до углового коллиматоров;  $g$  — рабочее расстояние, расстояние от выходной границы эффективного поля последней линзы до плоскости мишени;  $a_i$  — расстояние, характеризующее расположение  $i$ -й линзы;  $l$  — длина системы;  $L_{E,(i)}$  — эффективная длина поля  $i$ -й линзы.

Каждая из линз запитана от источника тока, обеспечивающего распределение квадрупольной компоненты поля  $W_{2,(i)}(z)$  вдоль оптической оси  $z$ . Локальная декартова система координат каждой линзы совмещена с оптической осью линзы  $z$  и ее плоскостями квадрупольной антисимметрии. Оптические оси всех линз совпадают с продольной осью  $Z$  лабораторной системы координат. Локальные системы координат линз могут либо совпадать с лабораторной системой, либо быть повернуты относительно оси  $Z$  на угол  $\pm 90^\circ$ .

Определенную таким образом ЗФС мы называем зондоформирующей системой на базе параметрических мультиплетов магнитных квадрупольных линз, где в качестве варьируемых параметров могут быть:  $N$  — количество линз в системе;  $n$  — количество независимых источников питания;  $l, a, a_i, g, L_{E,(i)}$  определены выше. В настоящее время наиболее хорошо изучены и широко применяются триплеты ( $N = 3$ ) и квадруплеты ( $N = 4$ ) магнитных квадрупольных линз с двумя независимыми источниками питания ( $n = 2$ ). При этом вариант запитывания триплета, получившего наибольшее распространение и применяемого на микронзонде в Оксфорде [4], следующий: первая и вторая линзы запитаны от одного источника, а третья линза от другого независимого источника питания. При этом локальная система координат второй линзы повернута на угол  $\pm 90^\circ$  относительно оси  $Z$  лабораторной системы координат. В ЗФС, известной как „Русский квадруплет“ [5]

( $N = 4$ ), первая и четвертая линзы запитаны от одного источника, вторая и третья от другого независимого источника питания. Локальные системы координат второй и четвертой линз повернуты на угол  $\pm 90^\circ$  относительно оси  $Z$  лабораторной системы координат. Системы с  $N > 4$  и  $n > 2$  в настоящее время мало изучены. Квинтуплет ( $N = 5, n = 2$ ) магнитных квадрупольных линз применен на микронзондах в Мельбурне [6] и Сиднее [7].

В настоящей работе при оптимизации ЗФС учитывались параметры пучка, такие как энергия  $E_0$ , нормализованная яркость  $b$ , разброс ионов по энергии  $\delta_E = \Delta E/E_0$ , которые обеспечивает ускоритель ЭГП-10 ВНИИЭФ. Размеры линз и величина их поля выбирались с учетом магнитных характеристик применяемого материала. При выборе оптимальных параметров ЗФС варьировались геометрические параметры. Расчеты включали нелинейные эффекты, связанные с абберациями как собственными, так и паразитными, обусловленными физическим и технологическим несовершенствами линз. Выбор оптимальной ЗФС осуществлялся на основе критерия качества, базирующегося на величине тока, который данная система может обеспечить при фокусировке пучка в пятно на мишени с заданными размерами.

## Определение ионно-оптических свойств зондоформирующих систем

Под ионно-оптическими свойствами ЗФС мы подразумеваем коэффициенты уменьшения и абберации, включая хроматические абберации первого порядка, собственные абберации 3-го порядка и паразитные абберации 2-го и 3-го порядков, обусловленные секступольными и октупольными паразитными компонентами поля линз вследствие нарушения квадрупольной симметрии поля из-за технологических неточностей изготовления магнитопроводов и токовых катушек.

Величина градиента поля  $W_{2,(i)}(z)$  в каждой из линз ЗФС определяется из условия стигматичности системы при заданных параметрах параметрического мультиплета. Для расчета аббераций нами применен матричный метод — метод матрицантов [8]. В матричных методах абберации всей системы определяются на основе вычисления аббераций каждого активного элемента. Расчет аббераций магнитной квадрупольной линзы с учетом вкладов от паразитных компонентов поля линз в предложенном нами подходе [9] основывается на осевой модели поля. Предполагается, что в линзе существует прямолинейная оптическая ось, вдоль которой поле  $|\mathbf{B}| = 0$ . Естественно, это некоторое приближение, соответствующее траектории частицы, которая на входе и выходе из линзы не меняет своего положения и направления движения. В локальной декартовой системе координат  $(x, y, z)$  поле магнитной квадрупольной линзы в зазорах между полюсами описывается скалярным магнитным

потенциалом в виде

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

где  $W_2(z)$  — основная квадрупольная компонента;  $W_3(z)$ ,  $U_3(z)$  — основная и поворотная составляющие секступольной паразитной компоненты;  $W_4(z)$ ,  $U_4(z)$  — основная и поворотная составляющие октупольной паразитной компоненты.

Такую систему координат  $(x, y, z)$ , связанную с оптической осью линзы и плоскостями антисимметрии основной квадрупольной компоненты  $W_2(z)$ , мы называем собственной системой координат, а составляющие  $W_3(z)$ ,  $U_3(z)$ ,  $W_4(z)$  и  $U_4(z)$  — составляющими собственных паразитных компонент магнитной квадрупольной линзы. Очевидно, что выражение (1) представляет собой суперпозицию полей  $2n$ -полюсных мультиполей ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ). Причем каждое мультипольное поле имеет свою локальную систему координат, совмещенную с оптической осью и плоскостями своей антисимметрии, а несовпадение этой локальной системы координат с плоскостями антисимметрии за счет поворота относительно оптической оси приводит к появлению дополнительной вращательной составляющей  $U_n(z)$ . В силу того что паразитные мультипольные компоненты имеют случайный характер, их локальные системы координат имеют свободную ориентацию и не связаны с локальной системой координат квадрупольной компоненты, а следовательно, имеют как основную составляющую  $W_n(z)$ , так и вращательную  $U_n(z)$  при  $n > 2$ . Таким образом, любая незначительная трансформация линзы как жесткого целого приводит к перераспределению мультипольных компонент и/или появлению дополнительных паразитных составляющих: дипольной и/или паразитной поворотной квадрупольной компонент. Определению предельно допустимых паразитных компонент и связанных с ними технологических неточностей изготовления линзы и нарушений квадрупольной симметрии поля из-за различия запитывания полюсных наконечников посвящены работы [9,10].

Суть метода матрицантов заключается в переходе от фазового пространства  $(x, x', y, y')$ , описывающего положение и направление движения каждой частицы в магнитном поле, к пространству фазовых моментов. В нашем случае для расчета матрицы преобразования магнитной квадрупольной линзы, в которой поле описывается скалярным магнитным потенциалом (1), пространство фазовых моментов представлено

вектором

$$\begin{aligned} \mathbf{X} = & (x, x', y, y', x\delta, x'\delta, y\delta, y'\delta, x^2, xx', x'^2, y^2, yy', \\ & y'^2, xy, x'y, xy', x'y', x^3, x^2x', xx'^2, x'^3, xy^2, xyy', \\ & xy'^2, x'y'^2, x'yy', x'y'^2, y^3, y^2y', yy'^2, y'^3, yx^2, yxx', \\ & yx'^2, y'x^2, y'xx', y'x'^2)^T, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $x, y$  — отклонения частиц пучка от оптической оси  $z$ ;  $x', y'$  — углы между проекциями вектора скорости на плоскости  $xOz$  и  $yOz$  с осью  $z$ , задающих направление движения частиц;  $\delta = (p - p_0)/p_0$  — разброс частиц по импульсу от некоторого своего среднего значения  $p_0$ .

Эволюция вектора  $\mathbf{X}$  вдоль оси  $z$  в методе матрицантов определяется соотношением

$$X(z) = \mathbf{R}(z/z_0)X(z_0), \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}(z/z_0)$  представляет собой матрицант (матрица преобразования координат пространства фазовых моментов размерности  $38 \times 38$  из плоскости  $z_0$  в плоскость с координатой  $z$ ), причем первая и третья строки матрицанта содержат полный набор линейных свойств магнитной квадрупольной линзы и аббераций, включая хроматические, паразитные 2-го и 3-го порядков, обусловленные секступольными и октупольными компонентами, а также все собственные геометрические абберации 3-го порядка. Для прямоугольного распределения составляющих компонент поля  $W_2(z)$ ,  $W_i(z)$ ,  $U_i(z)$ ;  $i = 3, 4$  получено аналитическое представление матрицанта.

На основе изложенного подхода разработана программа PROBFORM, которая позволяет определять ионно-оптические свойства зондоформирующих систем на базе параметрических мультиплетов магнитных квадрупольных линз. Проведено тщательное тестирование программы на аналитических моделях в сравнении с расчетами других авторов, а также на экспериментальных данных [11].

## Критерий качества зондоформирующей системы

Говоря об ионно-оптических свойствах ЗФС и подразумевая под ними коэффициенты уменьшения и абберации, стоит отметить, что поиск совершенных ЗФС основан на создании систем с большими коэффициентами уменьшения при низких абберациях, так как первые приводят к уменьшению пятна на мишени, вторые — к его увеличению. К сожалению, во всех ЗФС рост коэффициентов уменьшения приводит к значительному увеличению аббераций, поэтому вопрос выбора оптимальных ЗФС сводится к вопросу о соотношении коэффициентов уменьшения и аббераций в конкретно выбранной системе. За счет варьирования параметров в параметрических ЗФС производится поиск таких систем,

у которых такое соотношение приводит к возможности создания на мишени пятна с максимальной плотностью тока. Поэтому критерием качества ЗФС является величина плотности тока в пятне на мишени, т. е. среди множества систем стоит отдавать предпочтение тем, которые обеспечивают большую величину тока при заданных размерах пучка на мишени. Этот критерий вытекает из требований аналитических методик, применяемых для анализа вещества или при исследованиях физических процессов, когда информация поступает из акта взаимодействия частиц пучка с атомами мишени. Очевидно, что число таких событий находится в прямой зависимости от количества частиц, падающих в единицу времени в пятно на мишени, при этом пятно должно иметь минимально возможные размеры для определения структуры распределения элементов в исследуемом веществе. Поэтому в ряде приложений существуют ограничения на минимальную величину тока пучка, что позволяет за критерий качества в данном случае принимать минимальные размеры пучка на мишени при фиксированном токе [12,13]. Как известно, величина тока  $I \approx b \cdot \varepsilon \cdot E$ , где  $b$ ,  $\varepsilon$ ,  $E$  — нормализованная яркость, эмиттанс и энергия пучка соответственно. Так как нормализованная яркость является характеристикой источника ионов и системы транспортировки пучка и отличается по величине для различных ускорителей, то для каждой ЗФС общего назначения необходимо иметь функциональную зависимость  $d = \hat{d}^*(\varepsilon)$ , где  $d$  — минимальные размеры пучка при фиксированном эмиттансе  $\varepsilon$ . Из физических соображений функция  $\hat{d}^*(\varepsilon)$  является монотонно возрастающей (увеличение  $\varepsilon$  приводит к увеличению  $d$ ). В этом случае обратную зависимость  $\varepsilon = \hat{\varepsilon}^*(d)$  можно построить, основываясь на принципах поиска максимального эмиттанса пучка при фиксированных его размерах на мишени. Нами предложен метод, в основу которого положены эти принципы [14]. Метод максимального эмиттанса пучка реализован в численном коде MaxVEmit и позволяет определять максимальный эмиттанс, который может обеспечить произвольная ЗФС при фокусировке пучка на мишени в пятно с заданными размерами.

## Выбор оптимальных параметров зондоформирующей системы

Проведены исследования влияния различных геометрических и физических параметров на ионно-оптические свойства ЗФС на базе параметрических мультиплетов магнитных квадрупольных линз с учетом предложенного критерия определения качества систем, который позволяет сделать выбор оптимальной ЗФС для микронзонда на базе электростатического ускорителя ЭПП-10 ВНИИЭФ. Этот выбор базируется на следующих положениях. В работах [9,15] показано, что „Русский квадруплет“ имеет более высокое качество, чем триплет типа „Оксфорд“, а увеличение числа линз до пяти не приводит к значительному повышению плотности тока

на мишени. Поэтому выбранная ЗФС основывается на мультиплете типа „Русский квадруплет“ ( $N = 4$ ,  $n = 2$ ). Проведенные ранее исследования [15] дают основание утверждать, что для ускорителей с разбросом пучка по энергии на уровне  $\delta_E \sim 10^{-3}$  качество ЗФС практически не зависит от длины системы в пределах  $2 \text{ m} < l < 9 \text{ m}$ , при этом эти системы не в состоянии обеспечить режимы с субмикронным разрешением при токах  $I \sim 100 \text{ pA}$  для методик PIXE, RBS, NRA. Это объясняется тем, что хроматические аберрации приведут к необходимости значительного уменьшения размеров коллиматоров для обеспечения заданных в данном случае субмикронных размеров пучка на мишени и, как следствие, к снижению тока. Поэтому нет необходимости выбирать ЗФС с высокими коэффициентами уменьшения ( $D \approx 100$ ), которые обеспечивают длинные системы с  $l = 7-9 \text{ m}$ . Ограничением в разрешающей способности является также невысокая нормализованная яркость пучка  $b \approx 1 \text{ pA}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{MeV})$ , которую обеспечивают перезарядные ускорители со штатным ионным источником типа дуаплазматрон. В добавление необходимо учитывать условие размещения канала микронзонда.

Исходя из вышесказанного за базовую длину ЯСМЗ принята длина ЗФС  $l = 4 \text{ m}$ . При заданной базовой длине необходимо выбрать следующие параметры системы:  $a$  — объектное расстояние;  $g$  — рабочее расстояние;  $L_{E,(1)}$ ,  $L_{E,(2)}$  — эффективные длины линз;  $r_a$  — радиус апертуры линз;  $W_i/W_2$ ,  $U_i/W_2$ ;  $i = 3, 4$  — предельно допустимые относительные уровни паразитных компонент поля в магнитных квадрупольных линзах.

Эти параметры должны определять оптимальную ЗФС с точки зрения обеспечения максимума величины тока при заданных размерах пятна на мишени.

В работе [9] показано, что для ЗФС на базе триплета типа „Оксфорд“ и „Русского квадруплета“ максимально допустимые относительные уровни паразитных компонент поля в магнитных квадрупольных линзах составляют  $W_3/W_2 = U_3/W_2 = 0.000375 [1/\text{cm}]$  и  $W_4/W_2 = U_4/W_2 = 0.000538 [1/\text{cm}^2]$ . Выбор радиуса апертуры линзы основывается на величине точности позиционирования полюсного наконечника, которую может обеспечить оборудование при изготовлении магнитопровода. В нашем случае станок с проволочной электроэрозией и дополнительными технологическими циклами обеспечивает точность позиционирования полюсного наконечника как жесткого целого  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Проведенные расчеты показывают, что в магнитных квадрупольных линзах с радиусом апертуры  $6.5 \text{ mm}$  с точностью позиционирования полюсных наконечников  $< \pm 5 \mu\text{m}$  не будут превышены предельно допустимые уровни паразитных компонент поля.

На рис. 2 приведены характеристики ЗФС в зависимости от параметров  $a$ ,  $L_{E,(1)}$ ,  $L_{E,(2)}$ :  $a$  — максимальный эмиттанс, который рассмотренные системы могут обеспечить при фокусировке пучка ионов  $\text{H}^+$  с энергией  $14 \text{ MeV}$  в квадратное пятно на мишени с размерами  $d = 1.8 \mu\text{m}$  при заданном рабочем расстоянии  $g = 20 \text{ cm}$

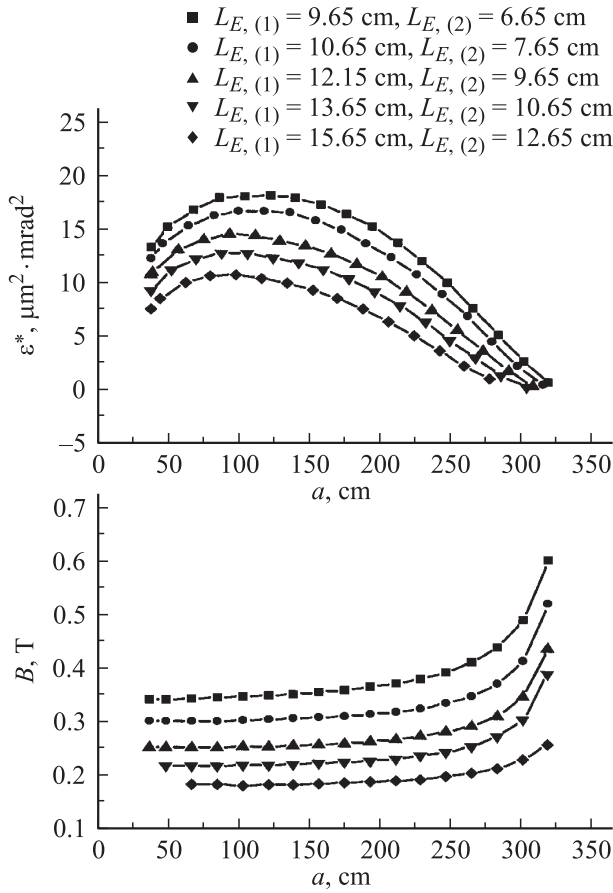


Рис. 2. Максимальный эмиттанс  $\epsilon^*$  и максимальная магнитная индукция на полюсном наконечнике квадрупольных линз в зондоформирующих системах в зависимости от параметров  $a, L_{E,(1)}, L_{E,(2)}$ .

(при расчете не учтены паразитные aberrации),  $b$  — величина магнитной индукции  $B$  на полюсных наконечниках, необходимая для обеспечения требуемых параметров пучка на мишени при соответствующих длинах линз. Выбор длин линз основан на следующих критериях. Максимальная индукция на полюсе должна обеспечивать требование  $B < 0.27 \text{ T}$ , что обусловлено областью линейных характеристик материала полюсных наконечников. При этом системы, использующие эти линзы, должны обеспечивать максимальный эмиттанс.

Из рис. 2 видно, что системы с эффективными длинами линз  $L_{E,(1)} = 12.15 \text{ cm}$  и  $L_{E,(2)} = 9.65 \text{ cm}$  имеют наибольший эмиттанс и удовлетворяют ограничениям на максимальную величину магнитной индукции на полюсном наконечнике. Эти длины выбраны за базовые размеры магнитных квадрупольных линз в ЗФС.

На рис. 3 показаны те же характеристики систем, что и на рис. 2, в зависимости от параметров  $g, a$ . Из рис. 3 видно, что уменьшение рабочего расстояния  $g$  приводит к увеличению эмиттанса, однако это сопровождается ростом величины магнитной индукции  $B$  на полюсном наконечнике, которая выходит за пределы

ограничений. Кроме того, в ЯСМЗ будет использована двухкоординатная  $(x, y)$  ферромагнитная сканирующая система с неявно выраженными полюсными наконечниками с длиной активной зоны 12 см, конструкция кото-

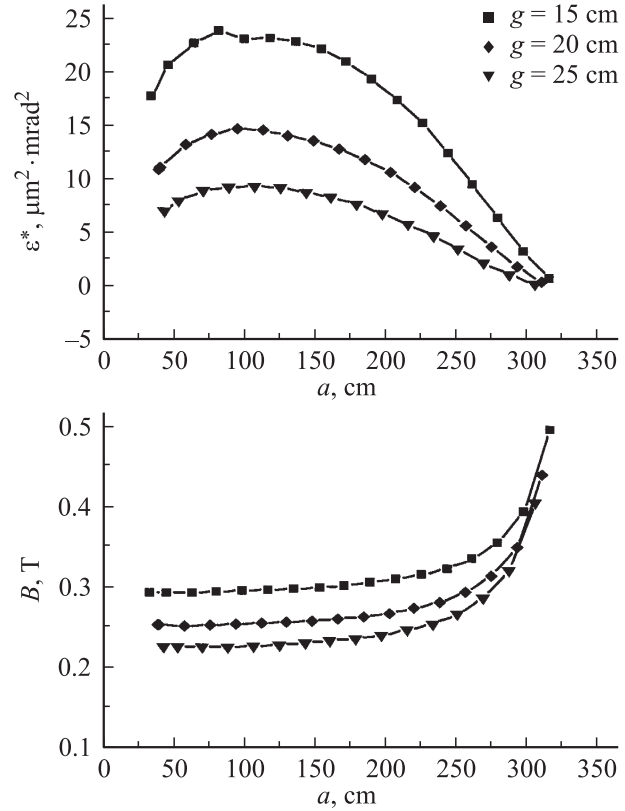


Рис. 3. Максимальный эмиттанс  $\epsilon^*$  и максимальная магнитная индукция на полюсном наконечнике квадрупольных линз в зондоформирующих системах в зависимости от параметров  $a, g$ . Эффективные длины линз  $L_{E,(1)} = 12.15 \text{ cm}$  и  $L_{E,(2)} = 9.65 \text{ cm}$ .

- $W_3/W_2 = 0.0 [1/\text{cm}], W_4/W_2 = 0.0 [1/\text{cm}^2]$
- ▼  $W_3/W_2 = 0.000375 [1/\text{cm}], W_4/W_2 = 0.000538 [1/\text{cm}^2]$
- ◆  $W_3/W_2 = 0.00094 [1/\text{cm}], W_4/W_2 = 0.00174 [1/\text{cm}^2]$

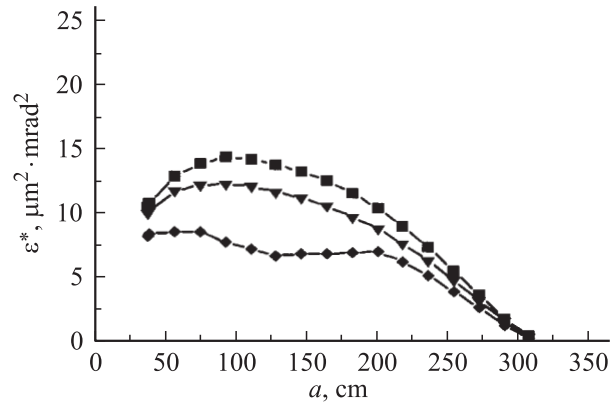


Рис. 4. Максимальный эмиттанс  $\epsilon^*$  для зондоформирующих систем в зависимости от объектного расстояния  $a$  и различных уровней паразитных компонент поля в магнитных квадрупольных линзах.

Параметры базовой ЗФС („Русский квадруплет“ магнитных квадрупольных линз) для электростатического перезарядного ускорителя ЭП-10 ВНИИЭФ

Длина системы, $l$ [cm]	400.0
Эффективные длины линз: $L_{E,(1)}$ [cm]	12.15
$L_{E,(2)}$ [cm]	9.65
Расстояние между линзами в дублетах, $a_2 = a_4$ [cm]	3.0
Расстояние между дублетами, $a_3$ [cm]	129.0
Радиус апертуры линз, $r_a$ [cm]	0.65
Рабочее расстояние, $g$ [cm]	20.0
Объектное расстояние, $a = a_1$ [cm]	201.4
Максимальная магнитная индукция на полюсе, $E = 14$ MeV, $B_{\max}$ [Т]	0.269
Коэффициенты уменьшения: $D_x$	27.2(27.2)
$D_y$	27.2(27.2)
Хроматические aberrации [ $\mu\text{m}/\text{mrad}/\%$ ]: $\langle x/x'\delta \rangle$	-607(-606)
$\langle y/y'\delta \rangle$	-125(-124)
Собственные сферические aberrации [ $\mu\text{m}/\text{mrad}^3$ ]: $\langle x/x'^3 \rangle$	807(840)
$\langle x/x'y'^2 \rangle$	177(123)
$\langle y/y'^3 \rangle$	16(19)
$\langle y/y'x'^2 \rangle$	177(123)
Паразитные aberrации, вызванные допустимыми секступольными компонентами [ $\mu\text{m}/\text{mrad}^2$ ]: $\langle x/x'^2 \rangle$	-92
$\langle x/x'y' \rangle$	-17
$\langle x/y'^2 \rangle$	3
$\langle y/x'^2 \rangle$	-8
$\langle y/x'y' \rangle$	6
$\langle y/y'^2 \rangle$	3
октупольными компонентами [ $\mu\text{m}/\text{mrad}^3$ ]: $\langle x/x'^3 \rangle$	370
$\langle x/x'y'^2 \rangle$	-63
$\langle y/y'^3 \rangle$	7
$\langle y/y'x'^2 \rangle$	-63
Размеры коллиматоров при фокусировке пучка $H^+$ , $E = 14$ MeV	
Квадратное пятно на мишени $d = 1.8 \mu\text{m}$ , $I = 100$ pA	
Объектный, $2r_x$ [ $\mu\text{m}$ ]	27
$2r_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	25
Квадратное пятно на мишени $d = 0.6 \mu\text{m}$ , $I = 1.7$ pA	
Объектный, $2r_x$ [ $\mu\text{m}$ ]	8
$2r_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	9

рой аналогична [16]. Во избежание влияния линзовых aberrаций, приводящих к деградации параметров пучка на краях растра, сканирующая система располагается за последней линзой по ходу движения пучка. При максимальной величине отклоняющего поля 0.02Т и длине рабочего расстояния  $g = 20$  см обеспечивается необходимый растр сканирования  $\pm 300 \mu\text{m}$ . Проведенные нами расчеты показывают, что для такой схемы сканирования увеличение размеров пучка на краю растра происходит не более чем на 2%, в основном это связано с хроматической неоднородностью пучка. Поэтому в данном случае выбор  $g = 20$  см минимально допустим как с физической, так и с технологической точки зрения.

На рис. 4 приведен максимальный эмиттанс для систем с вариантами длин линз  $L_{E,(1)} = 12.15$  см,  $L_{E,(2)} = 9.65$  см и рабочим расстоянием  $g = 20$  см в зависимости от объектного расстояния  $a$  при различных уровнях паразитных компонент поля. Как видно, наиме-

нее чувствительной к присутствию в линзах паразитных компонент поля является система с  $a = 201$  см, которая принята за базовую.

В таблице приведены все ионно-оптические свойства, геометрические и физические параметры базовой зондоформирующей системы на основе „Русского квадруплета“ магнитных квадрупольных линз. Паразитные aberrации приведены для максимально допустимых значений секступольной и октупольной компонент поля линз. Обозначение коэффициентов aberrаций принято исходя из соотношения преобразования координат частиц из плоскости объектного коллиматора  $(x_0, y_0)$  в плоскость мишени  $(x_M, y_M)$

$$\alpha_M = \dots + A_{ijklm}^{[\alpha]} x_0^i x_0'^j y_0^k y_0'^l \delta^m + \dots,$$

где  $A_{ijklm}^{[\alpha]} = \langle \alpha/x^i x'^j y^k y'^l \delta^m \rangle$  — коэффициенты aberrаций,  $\alpha = \{x, y\}$ ,  $i, j, k, l, m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Для сравнения в столбце значений коэффициентов уменьшения, хроматических и собственных сферических aberrаций в скобках указаны соответствующие величины, вычисленные с использованием программы PRAM [17].

Проведена наиболее полная оптимизация ЗФС на базе параметрических мультиплетов магнитных квадрупольных линз. За критерий качества системы была выбрана максимальная величина тока пучка при заданных размерах пятна на мишени, которая являлась целевой функцией в задаче оптимизации. Определены геометрические и физические параметры оптимальной ЗФС для ускорителя ЭПП-10 ВНИИЭФ. Расчетные размеры пучка на мишени составляют  $1.8 \times 1.8 \mu\text{m}$  при величине тока  $I \approx 100 \text{ pA}$ , энергии  $E = 14 \text{ MeV}$ , нормализованной яркости  $b \approx 1 \text{ pA}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot \text{MeV})$  и разбросе частиц пучка по энергии  $\delta_E = 10^{-3}$ .

## Список литературы

- [1] *Osipowicz T., van Kan J.A., Sum T.C. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2000. Vol. B 161–163. P. 83.*
- [2] *Meijer J., Weidenmuller U., Baving P. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2000. Vol. B 161–163. P. 898.*
- [3] *Силады М. Электронная и ионная оптика. Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 639 с.*
- [4] *Jamieson D.N., Grime G.W., Watt F. // Nucl. Instr. Meth. 1989. Vol. B 40/41. P. 669.*
- [5] *Дымников А.Д., Явор С.Я. // ЖТФ. 1963. Т. 33. Вып. 7. С. 851.*
- [6] *Jamieson D.N., Rout B., Szymanski R. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2002. Vol. B 190. P. 54.*
- [7] *Ryan C.G., Jamieson D.N. // Nucl. Instr. Meth. 1999. Vol. B 158. P. 97.*
- [8] *Дымников А., Hellborg R. // Nucl. Instr. Meth. 1993. Vol. A 330. P. 323.*
- [9] *Ponomarev A.G., Melnik K.I., Miroshnichenko V.I. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2003. Vol. B 201. P. 637.*
- [10] *Baranova L.A., Read F.H. // Optik. 2001. Vol. 112. N 3. P. 131.*
- [11] *Brazhnik V.A., Dymnikov A.D., Jamieson D.N. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1995. Vol. B 104. P. 92.*
- [12] *Wollnik H., Yavor M.I. // Nucl. Instr. Meth. 1999. Vol. B 158. P. 113.*
- [13] *Dymnikov A.D., Martinez G. // Nucl. Instr. Meth. 1997. Vol. B 130. P. 64.*
- [14] *Ponomarev A.G., Miroshnichenko V.I., Storizhko V.E. // Nucl. Instr. Meth. 2003. Vol. A 506. P. 20.*
- [15] *Brazhnik V.A., Miroshnichenko V.I., Ponomarev A.G. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2001. Vol. B 174. P. 385.*
- [16] *Khomenko V., Lebed S., Mordik S. // Nucl. Instr. Meth. 1997. Vol. B 130. P. 86.*
- [17] *Breese M., Jamieson D., King P. Materials Analysis Using a Nuclear Microprobe. New York: Wiley, 1996. P. 367.*