

ФОКУСИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ИЗ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭСУ-2

The focusing properties of a three-element quadrupole lens system have been studied. The present paper presents analysis for a three-element lens system in which the middle section has twice length of each of the outside sections, and the two outside sections have equal field-strength parameters.

Предварительные измерения тока пучка ускоренных до 250 кэВ ионов водорода на электростатическом ускорителе ЭСУ-2 показали, что при оптимальных значениях вытягивающего и фокусирующего напряжений ионного источника величина тока пучка не превышает 30 мкА. С целью выяснения причины ограничения значения величины тока были выполнены расчеты прохождения ионных пучков через оптические элементы канала для энергий ускоренных ионов водорода 200 кэВ и 1 МэВ (рис. 1). В основу расчетов положен метод огибающих ионно-оптического тракта, предложенный в [1].

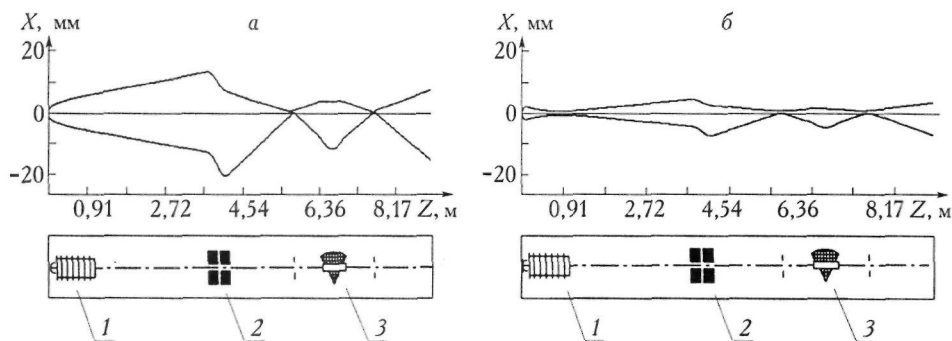


Рис. 1. Огибающие пучка в ионно-оптическом тракте при напряжении на ускоряющей трубке 200 кэВ (а) и 1 МэВ (б):

1 – ускоряющая трубка; 2 – фокусирующая линза; 3 – магнитный анализатор

Из полученных результатов следует, что для повышения величины тока на входе в магнитный анализатор (особенно в области низких энергий) до требуемой величины в точке, отстоящей от выхода ускоряющей трубки на расстоянии около 2 м, следует поместить фокусирующую систему с апертурой не менее 30 мм.

Выбор оптической системы. Для фокусировки заряженных частиц применяются электростатические и магнитные линзы, обладающие как достоинствами, так и недостатками. К достоинствам электростатических линз следует отнести их небольшой вес и габариты, относительную простоту конструкции и изготовления, потребление малых мощностей (можно использовать хорошо стабилизированные источники питания). По сравнению с магнитными линзами электростатические обеспечивают более высокую точность формирования поля и отсутствие остаточных полей и, следовательно, лучшую повторяемость распределения потенциала. Оптическая сила электростатических линз не зависит от массы заряженных частиц, поэтому при фокусировке пучков ионов с энергиями до 2 МэВ им следует отдать предпочтение перед магнитными [2]. Существует несколько типов электростатических линз, каждый из которых имеет свои области применения, связанные с особенностями их электронно-оптических свойств.

Возможность широкого использования квадрупольных линз [3] для фокусировки пучков заряженных частиц основана на том, что системы таких линз мо-

гут обладать собирающим действием по всем направлениям. Систему с достаточно гибкими оптическими свойствами можно создать из трех квадрупольных линз с чередующимся расположением собирающих и рассеивающих плоскостей (триплет) [4]. На рис. 2 представлен пример траекторий в триплете, плоскость XOZ которого для крайних линз является собирающей, а для средней линзы - рассеивающей. В плоскости YOZ действие линз противоположное. Две крайние линзы триплета L_1 и L_3 имеют одинаковую длину и возбуждение и равно удалены от средней L_2 , т. е. триплет симметричный.

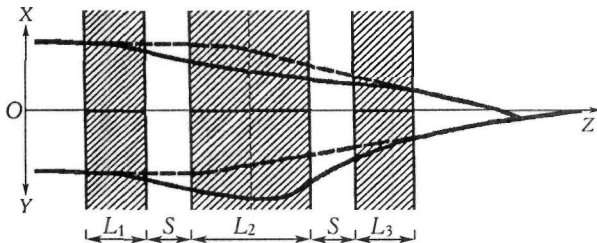


Рис. 2. Траектории и кардинальные элементы симметричного триплета

Главная особенность квадрупольных линз состоит в том, что в основной их части силовые линии направлены поперек фокусирующего пучка заряженных частиц, и, следовательно, поперечные поля сильнее воздействуют на изменение направления частиц. Фокусировка в таких системах - первого порядка.

Расчет распределения поля квадрупольной линзы в аналитическом виде или нахождение коэффициентов в его разложении в зависимости от формы электродов значительно упрощается, если поле считать двумерным. Наиболее простой случай - поле, проекция напряженности которого линейно растет во всем пространстве от оси линзы. Эквипотенциальные поверхности такого двумерного поля представляют собой гиперболические цилиндры (рис. 3).

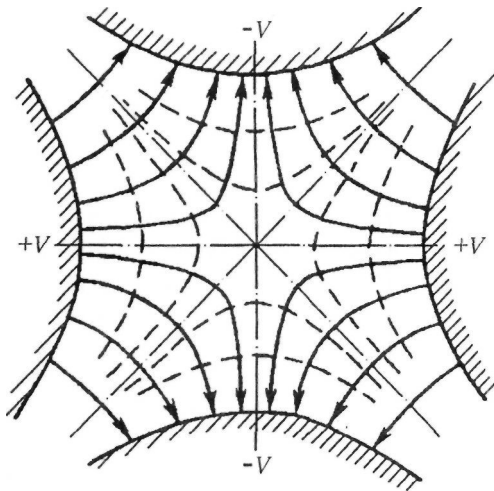


Рис. 3. Поле квадрупольной электростатической линзы с электродами в форме гиперболических цилиндров (силовые линии – сплошные, эквипотенциальные – штриховые)

При этом распределение потенциала определяется выражением [5]:

$$\varphi = \frac{1}{2} k(x^2 - y^2),$$

$$\text{где } k = \frac{2}{d} \left(\frac{nV}{E} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь d - диаметр апертуры, V - потенциал на электродах, n - число элементарных зарядов частицы, E - кинетическая энергия частицы.

Если совместить поверхности электродов с симметричными относительно оси Z эквипотенциальными поверхностями, то потенциалы на них будут равны

$$V = \pm \frac{1}{2} ka^2,$$

где a - радиус апертуры.

Однако изготовить электроды такой формы практически невозможно в отличие от электродов в виде круглых цилиндров. В [6] показано, что замена отрезка гиперболы, ограничивающей электрод дугой окружности некоего оптимального радиуса, не вызовет больших искажений поля линзы. Практически это выполняется, когда продольная длина линзы много больше ее апертуры, т. е. $2a/l \ll 1$, где $2a$ - апертура линзы, l - ее длина. При этом оптимальные ве-

личины радиуса круглых электродов находятся в пределах $r=1,10\pm 1,15a$ [6]. Эффективную длину можно представить формулой $L=l+1,06a$ [7].

Расчеты сложных многолинзовых систем рационально проводить матричным методом [7]. При таком подходе отдельная линза рассматривается как элемент, осуществляющий в параксиальном приближении линейное преобразование значений координат и углов наклона траекторий на входе в линзу в их значения на выходе. Матрица преобразования триплета представляет собой произведение трех матриц квадрупольных линз на две матрицы свободного пространства между ними. При помощи матриц тонких линз, протяженность полей которых мала по сравнению с длиной их фокусных расстояний, матрицу преобразования триплета можно представить в следующем виде [8]:

$$M_{\text{triplet}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1/f_2 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{vmatrix}.$$

С учетом этого выражения находим фокусное расстояние триплета:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{s_1}{f_1} \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_3} \right) + \frac{s_2}{f_3} \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} - \frac{s_1}{f_1 f_2} \right),$$

где f_1, f_2, f_3 - фокусные расстояния первой, второй и третьей линз в рассматриваемой плоскости триплета; величины $S=s_1=s_2$ — длины свободных пространств между тонкими линзами.

Конструкция триплета и согласование пучка с квадрупольной структурой. Для измерения характеристик пучка использовался метод диафрагмирования с измерением вырезанной части пучка на кварцевом экране. Система измерения позволяет получить данные о распределении плотности тока по сечению пучка. Геометрия области отбора ионов, определяющая начальные параметры пучка, изменялась в широких пределах. При измерении параметров пучка на выходе ускорителя было установлено, что характер распределения частиц по поперечным углам зависел от геометрии отбора ионов из ионного источника. Для него можно было выбрать такой режим работы при сравнительно низком значении потенциала на вытягивающем электроде, когда с увеличением тока вытягивания за счет изменения концентрации ионов в плазме источника и ее формы почти линейно вырастали величина тока и угол расходимости в пучке после источника. Но основной причиной, определяющей наблюдаемый характер распределения, можно считать aberrации ионно-оптической системы ускоряющей трубки, так что на входе в фокусирующую линзу поперечный размер пучка был сравним с размерами электродов триплета.

Известно [10], что электронно-оптические характеристики квадрупольных линз определяются распределением градиента по их оси. В связи с этим возникает задача определения потенциала линзы с заданным значением градиента на оси. Математическая задача сводится к определению потенциала $V(x, y, z)$, удовлетворяющего уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0,$$

где x, y, z - декартовы координаты, ось Z совпадает с осью симметрии линзы. Знание потенциала в свою оче-

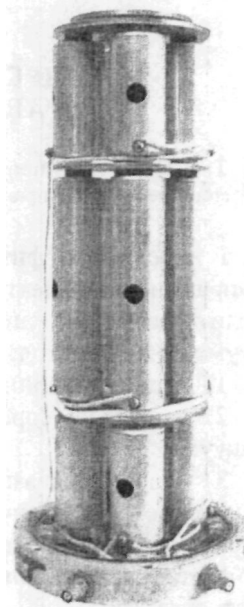


Рис. 4. Симметричный триплет

редь позволяет определить форму электродов, обеспечивающую необходимое распределение градиента по оси линзы.

Общий вид изготовленного симметричного триплета электростатических квадрупольных линз приведен на рис. 4. Его габаритные размеры составляют 400×114 мм. Электроды выполнены в виде четырех цилиндров из дюралюминия, изоляторы в линзе - из фарфора. Подводка напряжения в вакуум к линзам осуществляется изолированными подвешенными с достаточной жесткостью проводами снаружи линзы, чтобы не исказить ее поле.

При заданной геометрии триплета, варьируя потенциалы линз, можно изменять линейные увеличения, не нарушая стигматичности. Кроме того, триплет фокусирует астигматический пучок практически в точку, с его помощью также можно получить параллельный пучок на выходе. Величина потенциалов, подаваемых на электроды линзы, не превышала ± 7 кВ, при этом ток пучка на выходе из триплета достигал 80 мкА, что является пределом при использовании имеющихся источников питания и для данного типа ионного источника.

1. Шпак Е.В., Гаврилов Е.И. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 6. С. 1188.
2. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. Л., 1963.
3. Баранова Л.А., Явор С.Я. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 8. С. 1417.
4. Явор С.Я. Фокусировка заряженных частиц квадрупольными линзами. М., 1968.
5. Bullock M.L. // Amer. J. Phys. 1955. Vol. 23. № 5. P. 264.
6. Шукейло И.А. // ЖТФ. 1959. Т. 24. Вып. 10. С. 1225.
7. Kiss A., Koltay E., Ovsyannikova L.P., Yavor S.Y. // Nuclear Instruments & Methods. 1970. Vol. 78. P. 238.
8. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М., 1980.
9. Силадьи М. Электронная и ионная оптика. М., 1990.
10. Деревянкин Г.Е. // ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып. 6. С. 1178.

Поступила в редакцию 12.01.05.

Андрей Евгеньевич Лагутин - младший научный сотрудник лаборатории элионики НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ.