

УДК 537.212: 537.213

Система квадрупольных линз для транспортировки и сканирования ионных пучков высокой энергии

Л. А. Баранова, М. Ф. Кудояров, С. В. Милодан

Проведены компьютерное моделирование и оптимизация ионно-оптического тракта, предназначенного для фокусировки и сканирования ионных пучков, ускоренных циклотроном. Для увеличения амплитуды сканирования применен принцип усиления отклонения, основанный на рассеивающем действии квадрупольной линзы. Исследованы зависимость пропускания тракта от коэффициента усиления отклонения и влияние aberrаций отклонения. Найдены режимы с максимальным пропусканием.

PACS: 41.85.-p

Ключевые слова: компьютерное моделирование, ионный пучок, циклотрон, фокусировка.

Введение

Ионные пучки высоких энергий являются чрезвычайно эффективным инструментом, применяемым как в области физического эксперимента, так

и в сфере новейших высоких технологий. Так, ионные пучки, генерируемые циклотроном Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе, находят применение в целом ряде практических приложений. Одним из таких приложений является активно развиваемая технология трековых мембран. Основным процессом этой технологии является облучение движущихся полимерных пленок мишеней пучками тяжелых ионов высоких энергий, в результате чего в полимерном материале формируется множество областей с разрушенной структурой, преобразуемых далее в поры одинакового размера. При этом ионы должны обладать

Баранова Любовь Александровна, старший научный сотрудник.
Кудояров Михаил Федорович, ведущий научный сотрудник.
Милодан Сергей Владимирович, аспирант.
Физико-технический институт им. Иоффе.
Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26.
Тел. (812) 292-79-51.
E-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2009 г.

© Баранова Л. А., Кудояров М. Ф., Милодан С. В., 2010

вполне определенными и устойчивыми характеристиками, такими как энергия, направление движения, разброс углов наклона траекторий. В связи с этим чрезвычайно актуальной является задача оптимального формирования ионных пучков, с тем, чтобы максимально удовлетворить требованиям конкретных приложений.

В настоящей работе проведены численное моделирование и оптимизация ионно-оптического тракта, предназначенного для фокусировки и сканирования пучков протонов и тяжелых ионов, ускоренных циклотроном до энергий 1—10 МэВ. Численное моделирование осуществлялось с помощью программы СРОЗД [1].

Ионно-оптический тракт

Ионно-оптический тракт, предназначенный для фокусировки и сканирования ионных пучков высоких энергий и расположенный непосредственно за выходным окном циклотрона, был разработан и построен в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе несколько лет тому назад. В ходе настоящей работы никаких существенных конструктивных изменений вносить не предполагалось, цель компьютерного моделирования заключалась в поиске оптимальных режимов работы, обеспечивающих максимальные пропускание и усиление отклонения.

Схематическое изображение ионно-оптического тракта дано на рис. 1, *a*, на котором представлены только те элементы установки, которые формируют ход ионных траекторий и соответственно включены в модель численного расчета.

Ионно-оптический тракт включает в себя пять магнитных квадрупольных линз и электростатический отклоняющий элемент (сканер), осуществляющий сканирование поверхности образца ионным пучком. Применяется электростатический, а не магнитный сканер с тем, чтобы избежать явления гистерезиса при высокой частоте сканирования. Однако для отклонения ионов с энергией 1—10 МэВ требуется создать очень высокую напряженность электрического поля, что представляет собой серьезную технологическую проблему.

Для того чтобы облегчить достижение требуемой амплитуды сканирования, применяется принцип усиления отклонения, основанный на использовании рассеивающего действия квадрупольных линз. С этой целью последнюю квадрупольную линзу размещают между отклоняющим элементом и образцом так, что ее рассеивающая плоскость совмещается с плоскостью отклонения. Пучок ионов, отклоненный сканером, испытывает дополнительное отклонение в поле квадрупольной линзы, в результате чего угол наклона пучка увеличивается [2]. Возбуждения остальных квадрупольных линз

подбираются так, чтобы вся линзовая система осуществляла стигматичную фокусировку пучка на поверхности образца.

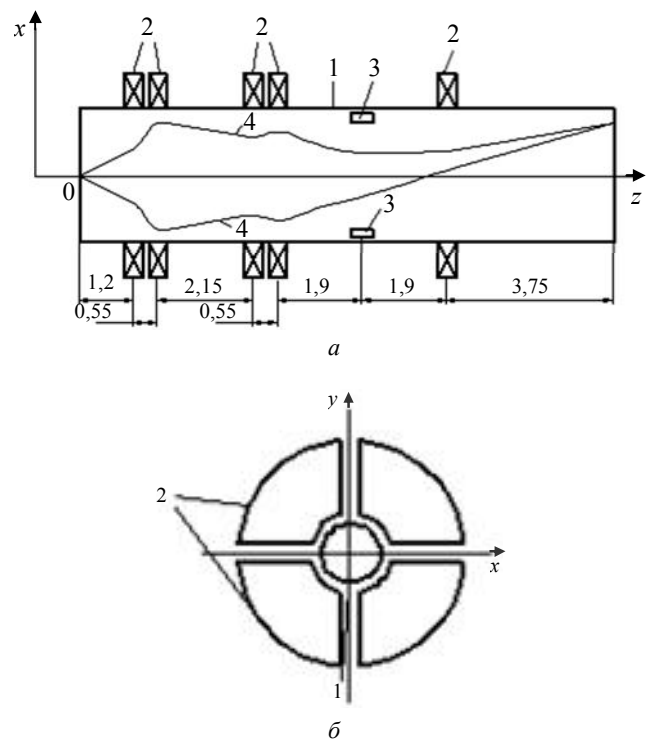


Рис. 1. Схематическое изображение:

- a* — продольного сечения ионно-оптического тракта плоскостью xOz . (Расстояния между центрами ионно-оптических элементов указаны в метрах).
 1 — вакуумная камера; 2 — катушки возбуждения магнитных квадрупольных линз (оси катушек расположены под углом 45° к осям x и y); 3 — электростатический сканер;
 4 — траектории ионов;
б — поперечного сечения магнитной квадрупольной линзы

Постановка задачи оптимизации

Как указывалось выше, основной задачей численного моделирования был поиск режимов работы ионно-оптического тракта, обеспечивающих максимальное пропускание. Определим пропускание T ионно-оптической системы как

$$T = Bx_0y_0x'_0y'_0,$$

где B — константа, характеризующая яркость источника ионов;
 x_0 и y_0 — размеры источника в направлениях x и y , соответственно;
 x'_0 и y'_0 — максимальные углы раствора пучка в двух перпендикулярных направлениях, проходящего через систему без потерь.

Это определение системы не является абсолютно строгим, здесь предполагается, что интенсивность источника не зависит от координат и углов наклона и максимальные углы раствора x'_0 и y'_0

не зависят от координат x_0 и y_0 , однако для наших целей такое упрощение вполне допустимо.

Ионно-оптическая система формирует на мишени пятно (изображение источника) с размерами: $x_i = M_x x_0$ и $y_i = M_y y_0$, где M_x и M_y — линейные увеличения системы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. На практике, как правило, требуется сформировать на мишени пятно определенного размера, для чего используется диафрагмирование пучка на входе в систему. В связи с этим целесообразно говорить об оптимизации приведенного пропускания T_r , которое характеризует интенсивность пучка, сфокусированного системой в пятно единичной площади:

$$T_r = \frac{T}{x_i y_i} = \frac{B x'_0 y'_0}{M_x M_y}$$

В дальнейшем будем говорить только о приведенном пропускании T_r , для краткости называя его "пропусканием".

Другой важной характеристикой системы является коэффициент усиления отклонения. Этот коэффициент растет с ростом возбуждения последней квадрупольной линзы, расположенной за сканером, однако очевидно, что возбуждение последней линзы не может устанавливаться независимо от возбуждений остальных линз. Величина пропускания системы и коэффициент усиления отклонения оказываются связанными между собой, что рассматривается ниже.

Численное моделирование ионно-оптического тракта

Программа СРОЗД, используемая в настоящей работе, позволяет рассчитывать трехмерные электростатические ионно-оптические системы, а также простейшие магнитные элементы, в частности соленоиды без железного сердечника. Электростатические поля рассчитываются численно на основании метода конечных элементов, а распределение поля, создаваемого магнитными элементами, — по аналитическим формулам.

В настоящей работе каждая квадрупольная линза моделировалась четырьмя соленоидами в

форме усеченного конуса. Меньший радиус соленоида составляет 0,085, больший радиус — 0,18 м; длина соленоида — 0,1 м; расстояние от узкого конца соленоида до оптической оси — 0,1 м. Оси соленоидов расположены под углом 45° к осям x и y .

Электростатический отклоняющий элемент образован двумя цилиндрическими пластинами с радиусом 0,04, длиной 0,64 и шириной 0,053 м. Полная длина тракта равна 12 м, внутренний диаметр вакуумной камеры — 0,1 м.

На первом этапе процесса оптимизации возбуждение последней квадрупольной линзы, усиливающей отклонение, сохранялось постоянным. Для удобства пользования будем задавать возбуждения квадрупольных линз в относительных единицах, относя их к возбуждению такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м. Тогда полученные данные можно легко использовать для ионов различных масс и различных энергий.

На первом этапе возбуждение последней (пятой) линзы составляло $\beta_5 = 0,39$. Коэффициент усиления отклонения K , определяемый как отношение угла наклона траектории на выходе из квадрупольной линзы к углу наклона на входе, при таком возбуждении и заданном взаимном расположении оптических элементов равен $K = 1,5$. Чтобы найти режимы с максимальным пропусканием, возбуждения остальных четырех линз варьировались в широких пределах. Питание линз осуществляется таким образом, что рассеивающее и собирающее действия линз чередуются, причем в плоскости отклонения (xOz) порядок линз определяется как *DCDCD* и, соответственно, в перпендикулярной плоскости (yOz) как *CDCDC*, где *C* — собирающее действие линзы, а *D* — рассеивающее.

Для обеспечения стигматичной фокусировки на мишени достаточно двух степеней свободы, поэтому в процессе поиска оптимальных режимов возбуждения первых двух линз изменялись с постоянным шагом, а двух других линз подбирались так, чтобы обеспечить стигматичную фокусировку ионного пучка на мишени. Достаточно репрезентативная часть полученных результатов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Номер режима	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	x'_0	y'_0	M_x	M_y	T_r
1	0	0	0,73	0,85	0,39	0,0083	0,0090	2,2	0,66	$B \cdot 5,2 \cdot 10^{-5}$
2	0,47	0,47	0,76	0,83	0,39	0,0097	0,0091	2,5	0,67	$B \cdot 5,2 \cdot 10^{-5}$
3	0,77	0,77	0,73	0,76	0,39	0,013	0,0094	3,3	0,69	$B \cdot 5,2 \cdot 10^{-5}$
4	1,09	1,09	0,53	0,50	0,39	0,020	0,0097	6,0	0,72	$B \cdot 4,5 \cdot 10^{-5}$
5	1,11	1,09	0	0	0,39	0,020	0,0076	7,9	0,56	$B \cdot 3,4 \cdot 10^{-5}$

Примечание. β_i — возбуждения квадрупольных линз, обеспечивающие стигматичную фокусировку ионного пучка на мишени; x'_0 и y'_0 — максимальные углы раствора пучка на выходе из циклотрона, проходящие через ионно-оптический тракт без потерь; M_x и M_y — линейные увеличения системы; T_r — приведенное пропускание.

Из табл. 1 видно, что в большом диапазоне возбуждений квадрупольных линз пропускание ионно-оптического тракта остается неизменным. Даже в том случае, когда возбуждения первых двух линз равны нулю и фокусировка осуществляется только тремя последними линзами, пропускание системы не меньше, чем при работе всех пяти линз. Максимальный захватываемый угол раствора пучка α_0' в этом случае уменьшается, однако уменьшается также и линейное увеличение M_x , в результате чего T_r остается неизменным. Пропускание начинает падать только при малых возбуждениях третьей и четвертой линз и достигает минимальной величины, когда возбуждения этих линз равны нулю. Этот эффект связан с ростом линейного увеличения M_x , захватываемый угол раствора α_0' в этих режимах не меньше, чем в предыдущих.

Следует отметить, что данные, приведенные в табл. 1, получены при выключенном сканере и, соответственно, относятся к неотклоненному пучку. Расчеты, проведенные при включенном сканере, показывают, что в результате отклонения пучка возникают aberrации отклонения, которые в

некоторых режимах приводят к существенному расширению пучка. Чем больше поперечный размер пучка внутри сканера в направлении отклонения, тем большее расширение пучка на мишени вызывают aberrации отклонения.

Расчеты показали, что среди первых трех режимов (см. табл. 1), обладающих одинаковым приведенным пропусканием в отсутствие отклонения, режим 3 характеризуется минимальными aberrациями, возникающими при сканировании пучка, и, следовательно, является оптимальным.

На рис. 2, а, б в качестве примера приведены траектории ионов в плоскостях xOz и yOz , соответственно, в режиме 3, построенные программой СРОЗД. Отметим, что программа отображает на графике только электростатические элементы, в нашем случае это вакуумная камера и отклоняющий элемент, положения магнитных линз легко определить по местам преломления траекторий. Масштаб рисунков существенно различен в продольном и поперечном направлениях — длина тракта равна 12 м, а внутренний диаметр вакуумной камеры составляет 0,1 м.

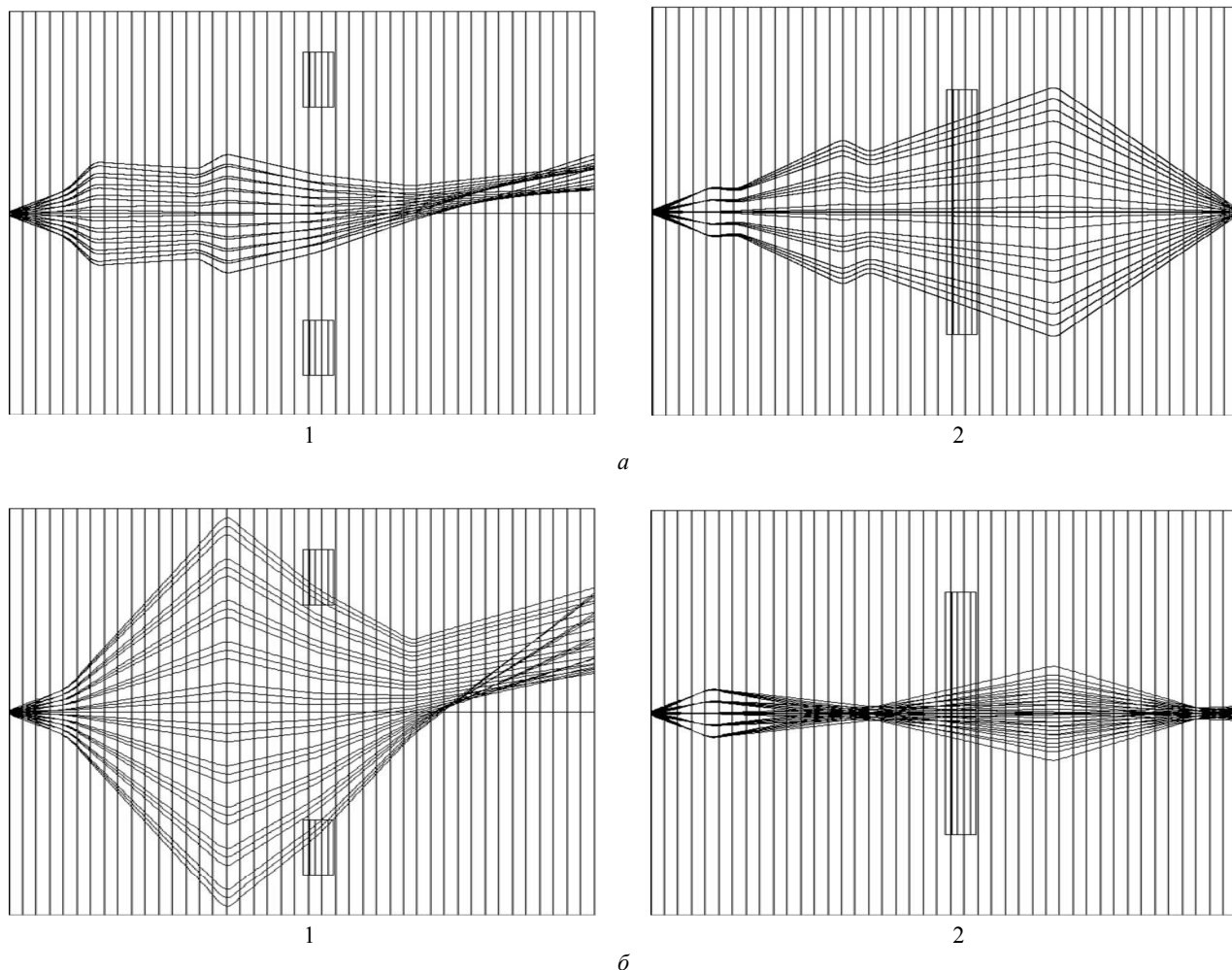


Рис. 2. Траектории ионов при источнике размером 1 мм, входном зрачке диаметром 6 мм, расположенном на расстоянии 1 м от входа в систему, в режимах: а — режим 3 (табл. 1); б — режим 1 (табл. 2); 1 — плоскость xOz ; 2 — плоскость yOz

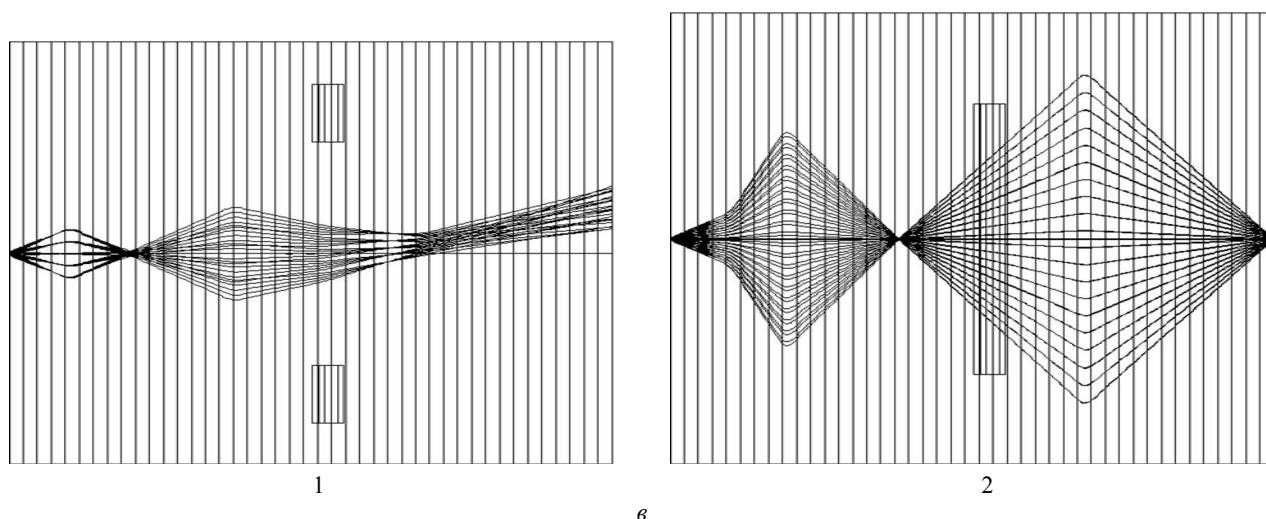


Рис. 2. Окончание.

а — режим 2 (табл. 2); 1 — плоскость xOz ; 2 — плоскость yOz

В работе была исследована также зависимость пропускания от коэффициента усиления отклонения. Очевидно, что для увеличения этого усиления необходимо увеличить возбуждение последней квадрупольной линзы. Расчеты показали, что когда возбуждение пятой линзы превышает значение $\beta_5 = 0,4$, стигматичной фокусировки можно добиться только в так называемых “режимах с пересечением”. В этих режимах траектории, по крайней мере, в одной плоскости (режим с одним пересечением) пересекают оптическую ось внутри системы, формируя промежуточный линейный кроссовер. В табл. 2 приведены характерные параметры для некоторых режимов с пересечением.

Линейное увеличение системы в плоскости отклонения в режиме 1 равно $M_x = 1,6$, а в режиме 2 оно более чем в пять раз больше — равно 9,0. Тем не менее, как видно из рис. 2, б (1) и 2, в (1) размер отклоненного пятна на мишени существенно больше в режиме 1. Это объясняется большими aberrациями отклонения в режиме 1, поскольку поперечное сечение пучка внутри сканера в этом случае очень велико [см. рис. 2, б (1)]. Следовательно, оценивая качество фокусировки, предпочтение следует отдать режиму 2. Следует учесть, однако, что режим 2 требует более высоких возбуждений квадрупольных линз, что может вызвать технические трудности при его осуществлении.

Таблица 2

Номер режима	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	x_0'	y_0'	M_x	M_y	T_r
1	1,14	0	0	0,46	0,53	0,0054	0,038	1,6	3,0	$B \cdot 4,3 \cdot 10^{-5}$
2	1,71	1,14	0	0,69	0,53	0,028	0,0068	9,0	0,5	$B \cdot 4,3 \cdot 10^{-5}$
3	1,08	0	0	0,47	0,78	0,0057	0,042	2,1	13,1	$B \cdot 0,9 \cdot 10^{-5}$

Примечание. Обозначения такие же, как в табл. 1, а T_r — приведенное пропускание в режимах (1, 3) с одним или (2) с двумя промежуточными кроссоверами.

Первые две строки табл. 1 относятся к режимам с одинаковым возбуждением пятой линзы и, следовательно, с одинаковым коэффициентом усиления отклонения, который равен $K = 1,7$. Как видно из табл. 1, в отсутствие отклонения пропускание T_r в обоих режимах одинаково. В режиме 1 траектории пересекают ось внутри системы только в плоскости yOz , формируя один промежуточный кроссовер. В режиме 2 формируются два промежуточных кроссовера как в плоскости xOz , так и в yOz .

Рис. 2, б и в иллюстрируют ход траекторий в режимах 1 и 2, соответственно, при работающем

В нижней строке табл. 2 приведены параметры режима с коэффициентом усиления отклонения $K = 2,0$. Мы видим, что пропускание системы по сравнению с двумя предыдущими случаями упало в пять раз. Работа в таком режиме с практической точки зрения вряд ли является целесообразной.

Подробное исследование зависимости пропускания от коэффициента усиления отклонения показало, что эта зависимость немонотонна. Максимальное пропускание $T_r = 5,2 \cdot 10^{-5}$ наблюдается при усилении отклонения в полтора раза (см. первые три строки табл. 1). В отсутствие усиления отклонения (пятая квадрупольная линза выключе-

на) пропускание равно $T_r = 3,0 \cdot 10^{-5}$, т. е. в 1,7 раза меньше максимального. Пропускание ионно-оптического тракта начинает уменьшаться с ростом K при $K \geq 1,5$, причем уменьшается очень резко при приближении к значению $K = 2,0$.

Заключение

В работе проведено численное моделирование ионно-оптического тракта, предназначенного для формирования пучков ионов высокой энергии. Применен принцип усиления отклонения с помощью квадрупольной линзы для увеличения амплитуды сканирования. Найдены режимы с максимальным пропусканием, обеспечивающие максимальную

интенсивность пучка на мишени. Показано, что зависимость пропускания от коэффициента усиления отклонения носит немонотонный характер, пропускание достигает максимума при коэффициенте усиления отклонения $K = 1,5$. Исследовано влияние аберраций отклонения.

Литература

1. Read F. H., Bowring N. J. CPO programs, available from www.electronoptic.com.
2. Баранова Л. А., Гусинский Г. М., Найденов В. О., Явор С. Я. Ионно-оптические системы для формирования пучков многозарядных ионов высокой энергии // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 11. С. 170—175.

Quadrupole lens system for transport and deflection of high energy ion beams

L. A. Baranova, M. F. Kudoyarov, S. V. Milodan

Ioffe Physico-Technical Institute RAS, 26 Polytechnicaya str., St.-Petersburg, 194021, Russia

E-mail: L.baranova@mail.ioffe.ru

Computer simulation and optimization have been carried out of ion transport line intended for focusing and deflection of ion beams generated by the cyclotron. Ion transport line includes five magnetic quadrupole lenses and electrostatic deflector. In order to increase amplitude of deflection the principle of amplification of deflection based on divergent action of quadrupole lens is employed. The dependence of ion line transmission on the coefficient of deflection amplification has been studied and focusing modes are found which are characterized by maximum transmission. The influence of aberrations of deflection is investigated.

PACS: 41.85.-p

Keywords: computer modeling, ion beam, cyclotron, focusing.

Bibliography — 2 references.

Received 18 November 2009