

Коробчатая линза с низким уровнем aberrаций

© В.В. Лукашевич

Петербургский институт ядерной физики НИЦ „Курчатовский институт“,
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия
e-mail: lukashevich_vv@pnpi.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 9 октября 2024 г.

В окончательной редакции 22 сентября 2025 г.

Принято к публикации 22 сентября 2025 г.

Найдены параметры коробчатой линзы с низким уровнем aberrаций. Для анализа свойств линзы и создания алгоритма итерационных процедур использовался метод фазовых диаграмм. Линейность преобразования траекторий в линзе достигнута варьированием параметров эллиптических зазоров между электродами и значениями потенциалов на электродах. На выходе линзы линейно сформированный пучок имеет ширину 40 mm и фазовую диаграмму в виде прямоугольника $40\text{ mm} \times 0.1\text{ mrad}$.

Ключевые слова: ионная оптика, эмиттанс, линзы, фазовая диаграмма, aberrации

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61809.325-24

Введение

В настоящей работе описаны технология проектирования и принцип работы коробчатой линзы с низким уровнем aberrаций. Линза предназначена для использования в высококачественных масс-спектрометрах и масс-сепараторах для разделения изотопов. Качество указанных приборов определяется уровнем aberrаций в электростатической фокусирующей системе и aberrациями дипольных магнитов.

В линейном приближении разрешающая способность магнитных анализаторов масс определяется отношением магнитного потока по траекториям частиц к эмиттансу пучка. По этой причине при постоянном эмиттансе разрешающая способность увеличивается с ростом ширины пучка, падающего на магнит. Поэтому установки хорошего качества можно создать, имея линейную оптику для формирования широких пучков ионов и компенсированные aberrации второго порядка в магнитах. Эти квадратичные aberrации устраняются при использовании полюсов магнита с круговыми границами, где выбирается такой радиус кривизны, при котором aberrации отсутствуют.

Другой способ заключается в использовании электростатических корректоров, описанных в работе [1]. Это наиболее дешевый и точный способ, так как изготовить и настроить корректор проще, чем протачивать кромки полюсных наконечников секторного магнита.

Гораздо сложнее достичь линейной фокусировки пучков ионов в электростатических линзах. Aberrации являются фундаментальным ограничением при создании любой лучевой оптики, на практике они ограничивают возможности пучковых приборов, особенно оптики с широкими, ленточными пучками частиц. Этот случай далек от параксиального приближения, а, согласно теории aberrаций, с отклонением частицы от оси aberrации растут.

Несмотря на большие успехи, достигнутые в оптике заряженных частиц, в настоящее время не известны электростатические оптические элементы, свободные от aberrаций. Описаны линзы, электроды которых представляют собой различные криволинейные поверхности, опробованы устройства с привлечением проводников с токами, заряженные сетки и т.д., но найти конфигурацию, свободную от aberrаций, не удалось. Разработаны мощные методы анализа и расчета ионно-оптических систем и их aberrаций [2]. Но в результате знание величин aberrаций позволяет судить лишь о качестве фокусировки, не давая ответ на вопрос, как уменьшить влияние aberrаций или сделать оптическую систему полностью линейной.

При известных уравнениях для aberrаций можно было бы поставить обратную задачу, найти такое распределение электростатического поля, которое обеспечивало бы линейную фокусировку. Такая задача не решена, но, если бы имелось такое решение, то возникла бы проблема реализации такого поля с помощью электродов.

1. Линза с низким уровнем aberrаций

Можно пытаться компенсировать aberrации, чему посвящено много усилий [2], но лучше осуществить поиск таких оптических элементов и систем, которые сами будут обеспечивать требуемые свойства при минимальных или нулевых aberrациях. Такой поиск, как правило, проводится методом проб и ошибок при наличии здравого смысла, больших вычислительных мощностей и набора параметров системы, которые можно варьировать с целью получения оптимального результата.

Известен только один тип линз, позволяющий реализовать такую программу. Это линза с плоскопараллельными электродами и криволинейными торцевыми зазорами между соседними электродами. Такая линза

описана в работе [1]. Положительным качеством такой линзы является наличие нескольких степеней свободы при проектировании линзы. Нормаль к криволинейной границе указывает на направление электростатического поля. Если поле направлено к оси, то это поле фокусирует частицы. Это имеет место в ускоряющем поле, когда зазор между электродами имеет выпуклую форму, т.е. центр кривизны находится за зазором между электродами по ходу частицы. Или же это имеет место в тормозящем поле с вогнутой формой зазора. В этом случае центр кривизны находится перед криволинейным зазором. В противоположных случаях частица рассеивается. Это имеет место при ускорении с вогнутой границей или торможении с выпуклой кривизной. Наиболее важным является тот факт, что при проектировании величину кривизны можно изменять в зависимости от расстояния частицы до оси линзы, тем самым локально изменять оптическую силу. Параметрами линзы являются следующие величины: длина электрода, ускоряющий или тормозящий потенциал электрода, если зазор между электродами является дугой эллипса, два радиуса эллипса (полуоси эллипса), знак кривизны зазора. Для получения ленточного пучка частицы в линзе сначала рассеиваются, а затем фокусируются в параллельный пучок.

Линза, описанная в работе [1], имеет линейно фокусирующее электростатическое поле. Практически реализовать такое поле сложно, поскольку необходимы технологические детали для сборки и крепления электродов. Эти детали вносят искажения в распределение поля, далее заряженные электроды создают электрические поля со стенками вакуумной камеры или другими внешними предметами, и эти поля через боковые зазоры в электродах также могут влиять на поле внутри электродов.

2. Коробчатая линза и фазовые диаграммы

В настоящей работе рассмотрена помехозащищенная линза, представляющая собой линзу работы [1], в которой имеются боковые стенки. Линза в этом случае становится коробчатой. Ее вид вместе с ионным источником и ленточным пучком представлен на рис. 1. Описание свойств подобных линз в литературе автору не известно.

Параметры линзы находятся с помощью процедуры компьютерного моделирования, описанного в рабо-

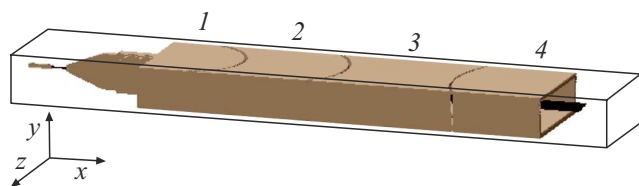


Рис. 1. Ионный источник, коробчатая линза и ленточный ионный пучок.

тах [1,3]. Процедура заключается в решении уравнения Лапласа на трехмерной сетке. Затем после вычисления распределения электростатического потенциала методом Рунге–Кутты вычисляются параметры траектории частицы. Число траекторных решений определяется желаемым уровнем статистики. Затем в выбранном сечении пучка регистрируется фазовая диаграмма. Эта диаграмма представляет собой главный инструмент для анализа свойств пучка, и ее вид задает направление последующих итерационных действий.

Фазовые диаграммы и их площади, называемые эмиттансом, исторически появились в физике ускорителей [4]. Поскольку в ускорителях поперечные импульсы частиц малы, пучки таких частиц хорошо описываются параксиальным (т.е. линейным) приближением. Из-за цикличности движения, действия на частицы высокочастотных полей и особенностей ионных источников, фазовые диаграммы пучков имеют вид эллипсов. Эллипсы описываются тремя параметрами Твисса. Это размеры полуосей и угол ориентации эллипса в фазовом пространстве.

Но в ионной оптике более удобно представление фазовой диаграммы в виде параллелограмма [5], потому что входные пучки, формируемые с помощью щелей и диафрагм, всегда имеют фазовые диаграммы такого вида. Далее фазовая диаграмма пучка на выходе из маленького отверстия ионного источника, как правило, также имеет вид параллелограмма или ромба.

Согласно теореме Лиувилля, при движении в электромагнитных полях эмиттанс пучка сохраняется: $\varepsilon = \overline{x_i x'_i} \sqrt{\overline{\varphi_i}} = \text{const}$, здесь φ_i — потенциал в сечении пучка, а площадь фазовой диаграммы выражена через средние значения.

Вторым важным свойством диаграммы является то, что фазовые точки на контуре диаграммы при преобразовании траекторий остаются на контуре вне зависимости от того, линейно преобразование или нет.

В ионной оптике в линейном (параксиальном) случае частицы, испущенные из точки объекта, собираются в точку в гауссовой плоскости — плоскости изображения. Но при наличии aberrаций частицы в плоскости изображения создают размытое пятно. Это означает, что отрезок прямой в фазовом пространстве объекта, отражающий выходящие из точки траектории, в фазовом пространстве изображения, становится искривленной линией.

Если контур входной фазовой диаграммы представлен прямыми отрезками, то при линейном преобразовании выходная диаграмма также имеет линейные границы. В нелинейном случае диаграмма имеет криволинейную форму. Измеряя фазовую диаграмму в разных точках траектории пучка, можно определить место появления aberrаций, а также установить расстояние траекторий от оси, где необходима локальная коррекция фокусировки, поскольку aberrации проявляются как избыток или как недостаток фокусирующей силы.

В работе [1] линейно фокусирующая четырехэлектродная линза имеет фазовую диаграмму пучка ионов в виде прямоугольника с размерами $40 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mrad}$.

Пучок в этой работе получен с ионным источником, находящимся под потенциалом 30 kV , а заряженные ионы вытягиваются электродом с потенциалом 17.5 kV из отверстия диаметром 1 mm .

Добавление стенок в линзу [1] изменяет распределение электростатического поля во внутреннем пространстве электродов, и линза теряет линейные свойства. Ее фазовая диаграмма представлена на рис. 2.

Согласно этому рисунку, боковые стенки резко усиливают фокусировку крайних траекторий частиц, указывая на то, что при удалении более 10 mm фокусирующее поле следует уменьшать. Такое ослабление достигается при увеличении поперечной направлению движения полуоси эллипса r_z . Путем последовательных итераций с изменением радиусов кривизны в эллиптических зазорах и подбора потенциалов для каждого из зазоров удастся достичь линейности фазовой диаграммы на выходе линзы.

Горизонтальные и вертикальные проекции траекторий пучка представлены на рис. 3, *a* и *b* соответственно.

Пучок обрывается в сечении, где измеряются фазовые диаграммы.

Горизонтальная фазовая диаграмма, имеющая вид параллелограмма, приведена на рис. 4, а на рис. 5 изображен профиль пучка.

Профиль пучка есть результат свертки по углу χ' данных рис. 4.

На обоих рисунках число частиц на краях пучка уменьшается.

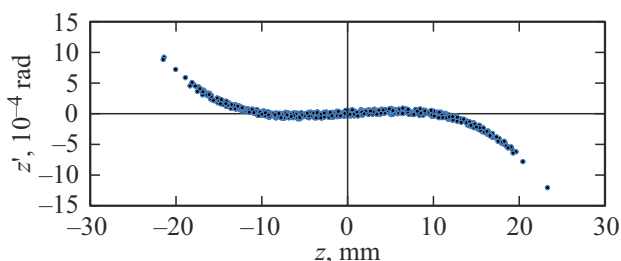


Рис. 2. Фазовая диаграмма пучка коробчатой линзы, полученной из линзы [1] при добавлении боковых стенок.

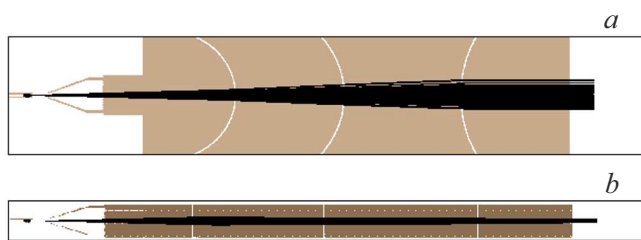


Рис. 3. *a* — горизонтальная проекция пучка, *b* — вертикальная проекция.

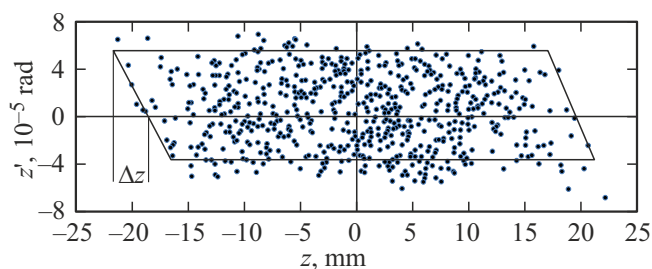


Рис. 4. Фазовая диаграмма пучка на выходе из коробчатой линзы.

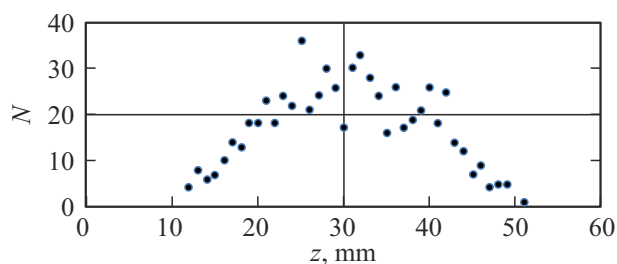


Рис. 5. Профиль пучка.

Параметры коробчатой линзы, которая преобразует траектории пучка линейно, определены в таблице.

3. Кроссоверы пучка

На рис. 4 более длинная диагональ параллелограмма ориентирована во втором и четвертом квадранте. Это указывает на то, что пучок сходится, и точка кроссовера находится впереди по трассе пучка. При дальнейшем распространении пучка диаграмма будет изменяться. Верхняя сторона фазового параллелограмма будет сдвигаться вправо, а нижняя — влево так, что через расстояние $l = \Delta z / z'$, примерно равное 60 m , параллелограмм превратится в прямоугольник. Это является отражением известного факта, что при линейном преобразовании кроссовер есть точка симметрии пучка.

Согласно таблице, электрические поля во втором и третьем зазорах (рис. 1) линзы являются фокусирующими (отклоняют частицы к оси пучка).

Имеется также второе решение, когда первый и второй зазоры рассеивают частицы, а фокусировка происходит только на третьем зазоре. Пучок при этом становится шире, и все траектории, удаленные от оси более 20 mm , становятся нелинейными. Углы траекторий, направленных к оси пучка, быстро нарастают с ростом расстояния частицы от оси пучка. Компенсировать эту нелинейность подбором полуосей эллипса не удастся. Для расстояний от оси, больших $\pm 20 \text{ mm}$, требуется более резкое ослабление кривизны зазора, даже может быть с изменением знака кривизны.

Программы проектирования типа Autocad или SolidWorks позволяют реализовать любой тип криволи-

Параметры коробчатой линзы.

Электрод	Потенциал, kV	Длина электрода, mm	Радиусы эллипса, левый торец электро		Радиусы эллипса, правый торец электрода	
			r_x , mm	r_z , mm	r_x , mm	r_z , mm
1	17.5	165			85	80
2	10	135	87.5	82.5	150	125
3	12.398	144	152.5	127.5	152.5	152.5
4	0	135	150	150		

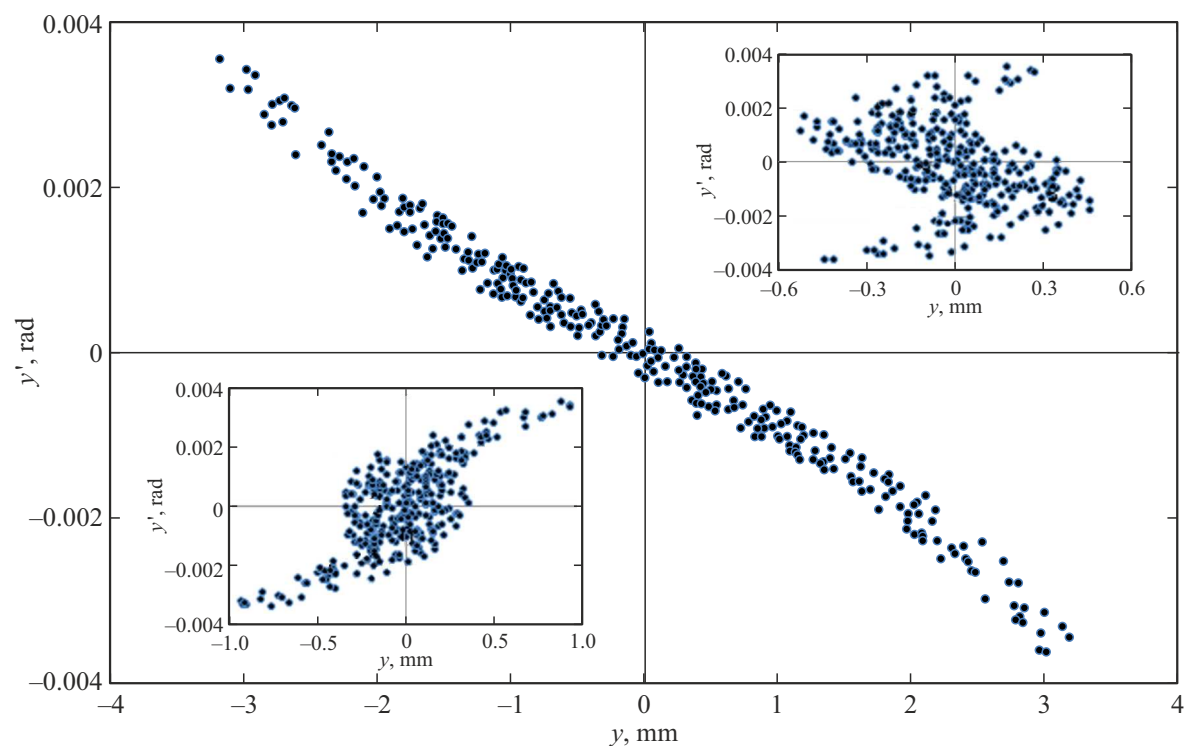


Рис. 6. Фазовая диаграмма пучка в вертикальной плоскости. На правой вкладке представлена диаграмма перед кроссовером, а на левой — диаграмма в точке кроссовера.

нейной формы зазора. Но другие криволинейные формы, кроме эллиптической, в настоящей работе не рассматривались.

Ленточное свойство пучка демонстрирует рис. 6 фазовой диаграммы в вертикальной плоскости.

В соответствии с рис. 3, *b* и рис. 6, в точке наблюдения пучок имеет размер порядка 6 mm. Пучок сходится (фазовая диаграмма проходит через второй и четвертый квадранты). Пройдя расстояние L , равное $L = y/\bar{y}'$, где величина представляет собой среднее значения угла наклона траектории при отклонении ее на величину y , пучок достигает положения кроссовера. Это происходит через 1150 mm. Фазовая диаграмма в этом случае изображена в левой нижней вставке рис. 6. Ширина линейно сфокусированного пучка составляет 0.6 mm с размером

по основанию 2 mm. В то же время наиболее узкий пучок по основанию в 0.9 mm находится перед кроссовером, как это демонстрирует правая верхняя вкладка на рис. 6. Напомним, что для безабберационных пучков самое узкое место пучка совпадает с кроссовером. Для сравнения укажем, что горизонтальная ширина пучка равна 40 mm.

Таким образом, в настоящей работе показано, что коробчатые линзы способны формировать широкие ленточные линейно сфокусированные пучки ионов. Малая угловая расходимость указывает на возможность транспортировки таких пучков на значительные расстояния.

Аберрации наблюдаются в случаях, когда аберрационные углы значительно превышают углы наклона линейных траекторий и быстро растут при отклонении

от оси пучка. По форме в соответствии с рис. 2 и нижней вкладкой рис. 6 средние линии фазовых диаграмм в этих случаях напоминает кривые третьего порядка.

Заключение

В теории аберраций известны восемь аберрационных коэффициентов [2], комбинации которых определяют типы аберраций, например, сферическую, астигматизм, дисторсию и т.д. В нашем случае аберрации проявляются интегрально, и способ их устранения сводится к локальному ослаблению (или усилению) фокусировки.

Поскольку плотность частиц в пучке постоянна, с ростом горизонтальной ширины пучка он становится более узким в вертикальной плоскости, и вклад аберраций для вертикального движения уменьшается. В кроссоверах соотношения размеров следующие: $z = 40 \text{ mm}$ и $y = 0.7 \text{ mm}$.

Отметим, что линейный ленточный пучок получен в достаточно компактной линзе. Ее размеры составляют 587 на 150 mm с высотой внутреннего пространства 40 mm.

Для коробчатой линзы получена такая же линейная фазовая диаграмма пучка, как и в линзе [1]. Как показано в работе [6], с такой линзой разрешающая способность масс-сепаратора увеличивается в несколько раз по сравнению с действующими установками.

Для увеличения ширины пучка, сверх полученного значения в 40 mm, необходимо дугу эллипса сшить с кривой, имеющей уменьшающуюся кривизну. Поиск такой комбинированной формы зазора пока не проводился. Другой способ заключается в увеличении горизонтального размера линзы.

Финансирование работы

Работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.В. Лукашевич. ЖТФ, **90** (6), 1016 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49292.288-19 [V.V. Lukashevich. Tech. Phys., **65** (6), 975 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220060201]
- [2] M. Szilagyi. *Electron and Ion Optics* (Plenum Press, NY, 1988)
- [3] В.В. Лукашевич. ЖТФ, **90** (3), 471 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.03.48934.90-19 [V.V. Lukashevich. Tech. Phys., **65** (3), 450 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220030135]

- [4] J.D. Lawson. *The Physics of Charged-Particle Beams* (Clarendon Press, Oxford, 1977) [Дж. Лоусон. *Физика пучков заряженных частиц* (Мир, М., 1980)]
- [5] H. Wollnik. *Optics of charged particles* (Academic Press, Inc., 1987) [Г. Вольник. *Оптика заряженных частиц* (Энергоатомиздат, СПб, 1992)]
- [6] В.В. Лукашевич. ЖТФ, **91** (11), 1756 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51540.76-21 [V.V. Lukashevich. Tech. Phys., **67** (14), 2270 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.14.55230.76-21]