

## Безабберационная линза и корректоры aberrаций

© В.В. Лукашевич

НИЦ „Курчатовский институт“ — ПИЯФ им. Б.П. Константинова,  
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия  
e-mail: lukashevich\_vv@pnpi.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 31 июля 2019 г.

В окончательной редакции 16 декабря 2019 г.

Принято к публикации 26 декабря 2019 г.

Описана безабберационная четырехэлектродная линза для формирования пучка ионов для масс-сепараторов или спектрометров. Линза является модификацией трансаксиальной линзы, в которой круговые зазоры между электродами заменены эллиптическими зазорами. Аксиально-симметричный пучок линза превращает в пучок ленточного типа. Параметры линзы найдены с помощью метода фазовых диаграмм. С помощью этого же метода разработаны новый корректор aberrаций для электростатических линз и новый корректор aberrаций секторного магнита.

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

DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49292.288-19

### Введение

Встречающиеся на практике конфигурации линз в оптике заряженных частиц отличаются большим разнообразием. Электроды в таких линзах могут быть диафрагмами, сплошными и полыми цилиндрами, парами плоскопараллельных пластин и различными их комбинациями. Кроме того, число таких комбинаций можно увеличить, применяя сферические, конические и другие криволинейные поверхности. Свойства большинства линз тщательно изучены. Имеется обширная информация о свойствах таких линз. Соответствующие сведения можно найти в большом количестве монографий по оптике заряженных частиц (например, в монографиях [1–3]), в трудах регулярных EMIS (электромагнитные изотоп сепараторы) конференций и в статьях в NIM-журналах.

Общим для всех типов линз является наличие геометрических aberrацией, увеличивающихся с ростом отклонения частицы от оси.

В литературе нет данных о линзах, свободных от aberrаций, хотя бы в одной плоскости: а именно плоскости дисперсии магнита.

В настоящей работе описываются линейно фокусирующая линза и новый тип корректоров aberrаций. При разработке линзы и новых корректоров используется метод фазовых диаграмм, представленный в работе [4].

В работе [4] показано, что имеется три причины нарушения линейности фокусировки. Величина отклоняющего поля с ростом отклонения частицы от оси превышает величину поля, необходимую для линейной фокусировки. Этим свойством обладают аксиально-симметричные и квадрупольные линзы. Во втором случае фокусирующее поле меньше необходимой величины, что характерно для трансаксиальных линз. И последний тип aberrаций присущ цилиндрическим конденсаторам и секторным магнитам, в которых для внешних отно-

сительно центра кривизны траекторий величина поля больше, а для внутренних траекторий меньше, чем необходимо для линейной фокусировки.

Как для новой безабберационной линзы, так и новых корректоров aberrаций выбор конфигурации электродов должен обеспечивать заданное распределение электрического поля, при котором линза или линза-корректор обладают заданными свойствами.

Упор сделан на применение плоских пар электродов, которые разделены криволинейными зазорами для формирования преломляющего электрического поля. Выбор таких ионно-оптических элементов обусловлен тем, что, регулируя кривизну зазора, можно сформировать линейно фокусирующее поле или нелинейно фокусирующее поле с заданным уровнем нелинейности. С другой стороны, подобный тип оптики хорошо соответствует симметрии дипольных магнитов в масс-сепараторах или спектрометрах.

В общем случае центральная часть фазовой диаграммы пучка частиц указывает на линейную фокусировку, а искривленные концы диаграммы демонстрируют интегральную нелинейность. Интегральная нелинейность является результатом действия членов второго и всех последующих порядков в разложении параметров конечной траектории в ряд по степеням исходных параметров. Задача заключается в получении такой конфигурации электростатического поля, при которой пучок на выходе линзы имеет линейную диаграмму.

Проектирование безабберационной линзы сводится к итерационной процедуре измерения фазовой диаграммы, коррекции геометрических параметров линзы и последующего измерения диаграммы. Эти итерации заканчиваются при достижении линейного вида диаграммы.

Такие же действия совершаются и для проектирования корректоров aberrаций с заданными свойствами.

Далее рассмотрим новую линейно фокусирующую линзу для масс-сепаратора или спектрометра.

Электрод	Потенциал, kV	Длина, см	Радиусы эллипса правый конец электрода		Радиусы эллипса левый конец электрода	
			$r_x$ , cm	$r_z$ , cm	$r_x$ , cm	$r_z$ , cm
1	17.5	11.5	8.5	8.0		
2	10	13.5	15	12.5	8.75	8.25
3	9.334	14.4	15.25	11.75	15.25	12.75
4	0	13.5			15	11.5

Примечание. Длина линзы равна 54 см, а вертикальное расстояние между пластинами 4 см.

### 1. Линза с линейной фокусировкой

Для нахождения параметров такой линзы используется источник ионов сепараторного типа, описанный в работе [4]. Аксиально симметричный пучок ионов вытягивается из источника с торцевым отверстием в 1 мм. Далее в линзе ионы ускоряются до энергии 30 keV. Тестирование проводится с пучком, эмиттанс которого равен 4 mm · mrad. Вид линзы вместе с источником и вытягивающим электродом представлен на рис. 1. Здесь и далее ионы летят в направлении оси  $x$ ;  $xz$  — горизонтальная плоскость, а  $yx$  — вертикальная.

Эта линза является модификацией трансаксиальной линзы. На первых двух зазорах электрические поля рассеивают частицы, на третьем зазоре частицы фокусируются.

В обычной трансаксиальной линзе зазоры между электродами являются дугами окружностей и задаются уравнением

$$\left(\frac{z}{r_z}\right)^2 + \left(\frac{x}{r_x}\right)^2 = 1, \quad r_z = r_x.$$

Как уже отмечалось, трансаксиальная линза фокусирует нелинейно. Части фазовой диаграммы пучка после прохождения линзы ориентируются в первом и третьем квадрантах фазовой плоскости. Это указывает на дефицит фокусировки, который нарастает с ростом отклонения частицы от оси пучка.

Модификация трансаксиальной линзы заключается в замене круговых зазоров эллиптическими дугами, где  $r_x > r_z$ . С уменьшением радиуса  $r_z$  увеличивается угол наклона электрического поля относительно траектории и соответственно растет отклоняющая сила.

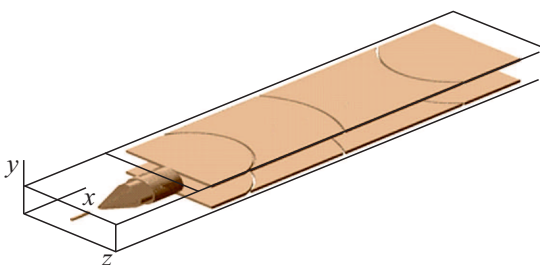


Рис. 1. Линза с линейной фокусировкой.

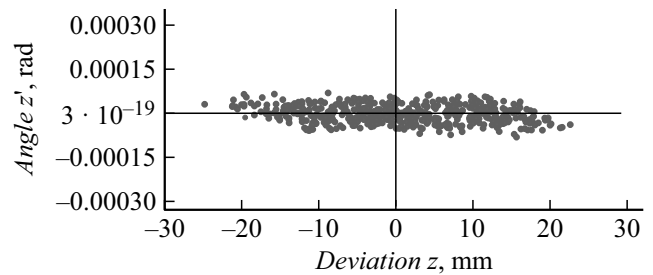


Рис. 2. Линейная фазовая диаграмма в горизонтальной плоскости.

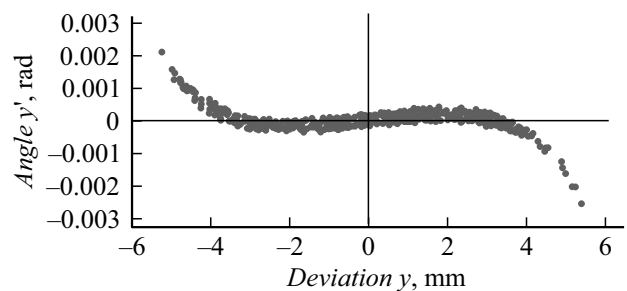


Рис. 3. Фазовая диаграмма в вертикальной плоскости.

Последовательно варьируются геометрические параметры зазоров для достижения линейной фокусировки. Поскольку в областях первого, второго и третьего электродов пучок частиц расходится, то для контроля линейности используются приведенные фазовые диаграммы, описанные в работе [4]. Потенциалы на электродах и геометрические параметры подбираются таким образом, что на выходе линзы пучок приблизительно параллелен в обеих плоскостях.

Линза с источником ионов проектировалась для установки в нейтронном канале реактора ПИК в ПИЯФ (Петербургский институт ядерной физики), имеющим диаметр 180 мм. Поскольку источник и линза размещаются в вакуумной трубе, то предельная ширина электродов линзы составляет 150 мм. Отсюда радиусы кривизны междуэлектродных зазоров не должны быть меньше 75 мм. Потенциалы на электродах и геометрические размеры линзы представлены в таблице.

Аксиально-симметричный на входе в линзу пучок трансформируется в ленточный пучок с линейной фа-

зовой диаграммой в плоскости  $x_z$ . Эта диаграмма изображена на рис. 2, а на рис. 3 представлена диаграмма пучка в вертикальной плоскости. Как видно из этих рисунков, ширина пучка в 4 с лишним раза больше его высоты. Разброс углов на рис. 2 и 3 обусловлен конечностью фазового объема входного пучка. В горизонтальной плоскости пучок практически параллелен. В свободном от полей пространстве, например между линзой и секторным магнитом, ширина пучка при исходной ширине 40 mm увеличивается всего на 0.5 mm на пролетной базе в 10 м. При использовании такого пучка в масс-сепараторе или спектрометре aberrации фокусирующей системы отсутствуют и корректировать, если это необходимо, нужно только aberrации магнита.

## 2. Корректоры aberrаций

В современных масс-сепараторах во многих научных центрах фокусировка пучков ионов осуществляется с помощью аксиально-симметричных или квадрупольных линз. Оба типа линз не обеспечивают линейность фокусировки. Для коррекции aberrаций широкое распространение получили мультипольные корректоры. Октапольные корректоры для исправления фокусировки электростатических линз и гексапольные корректоры для секторных магнитов.

В настоящей работе предлагается новый тип корректоров: а именно корректоры с плоскопараллельными парами электродов, и свойства этих корректоров сравниваются со свойствами мультипольных корректоров.

### 2.1. Корректоры для электростатических линз

Проектируемый корректор должен иметь следующие свойства. Его фазовая диаграмма в центральной области пучка линейна, но при отклонении частицы от этой области появляется нелинейность, равная по величине и противоположная по знаку нелинейности корректируемой линзы. Корректоры устроены по типу einzel lens, т.е. это три электрода, крайние из которых находятся под нулевым электрическим потенциалом. Возможны два типа этих корректоров. В первом из них в области среднего электрода частицы тормозятся, а во втором типе частицы ускоряются.

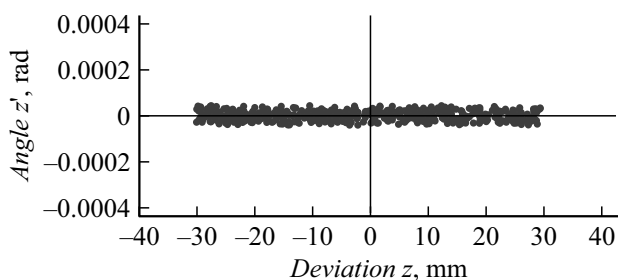


Рис. 4. Фазовая диаграмма пучка для тестирования корректоров.

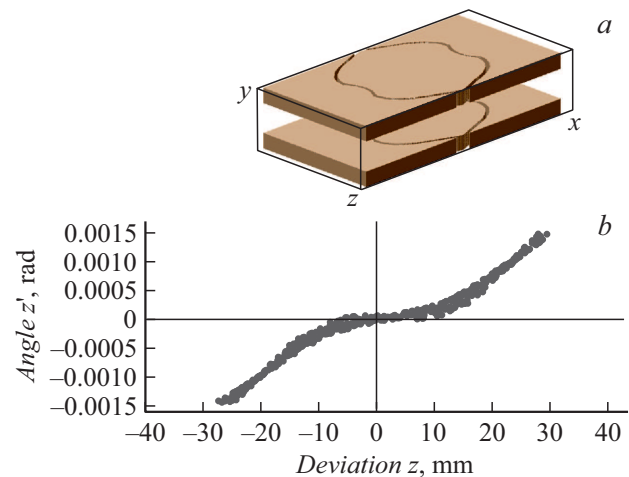


Рис. 5. *a* — корректор с торможением; *b* — фазовая диаграмма.

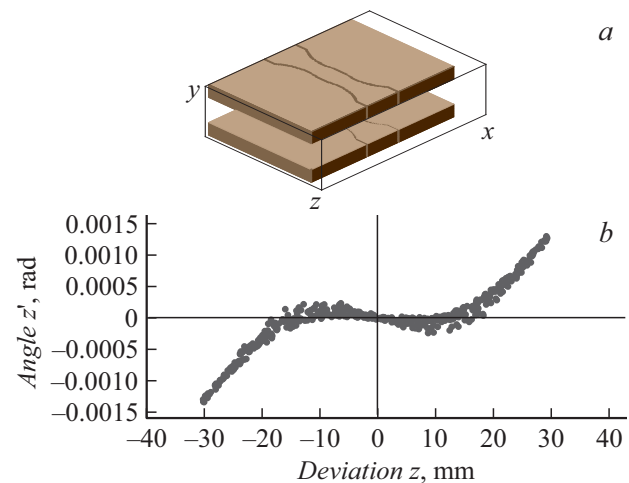
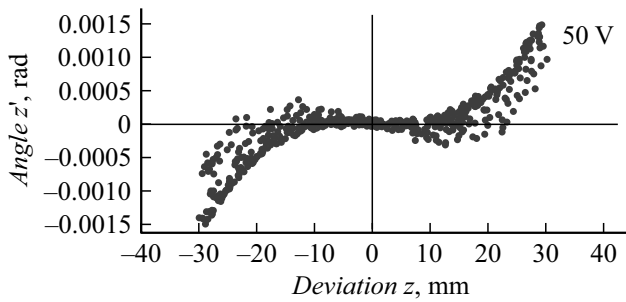


Рис. 6. *a* — корректор с ускорением, потенциал среднего электрода равен  $-50$  V; *b* — фазовая диаграмма пучка.

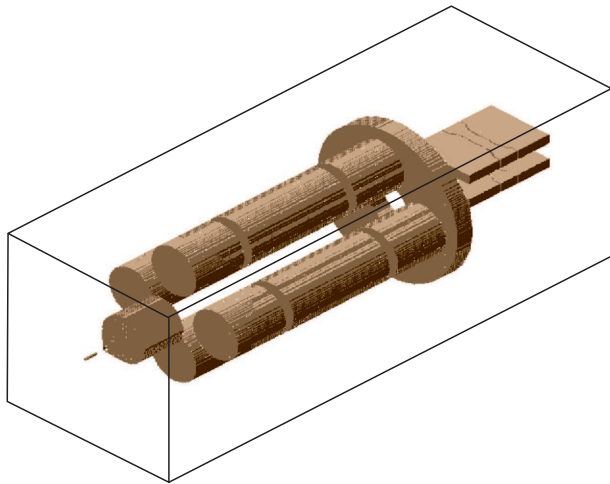
Для тестирования предлагаемых корректоров и известных октапольных корректоров используется входной пучок, фазовая диаграмма которого изображена на рис. 4. Размер пучка по вертикали выбран равным 20 mm.

Испытывались различные конфигурации корректоров: а именно корректор как линза, разрезанная вдоль оптической оси, а половинки разнесены на некоторое расстояние или же корректор со сплошными электродами, имеющие в центральной части плоскопараллельные зазоры. В обоих случаях центральная часть фазовой диаграммы располагается в первом и третьем квадрантах фазовой плоскости, т.е. центральная часть пучка расходится.

Этот эффект устраняется с помощью круговых фокусирующих зазоров в центральной области корректора (рис. 5, *a* и 6, *a*), которые компенсируют влияние рассеивающего поля, формируемого боковыми криволинейными зазорами. Радиусы кривизны этих зазоров



**Рис. 7.** Фазовая диаграмма пучка после октополя с потенциалами на электродах  $\pm 50$  V.



**Рис. 8.** Фокусирующая система, состоящая из квадрупольного триплета и корректора, изображенного на рис. 6.

подбираются так, чтобы фокусировка для центральных траекторий отсутствовала.

Для криволинейных боковых зазоров исследовались различные функциональные представления такие, как косинус, функции четвертой и шестой степени, окружности и эллипсы. Предпочтение отдано эллиптической форме зазоров, потому что, варьируя радиусы эллипса, легко достичь той же формы нелинейности, что и в корректируемой линзе. Масштаб коррекции углов траекторий определяется величиной потенциала на среднем электроде.

Корректор с торможением ионов в области среднего электрода с потенциалом 80 V изображен на рис. 5, *a*, а на рис. 5, *b* представлена фазовая диаграмма пучка.

Корректор с ускорением и его фазовая диаграмма изображены на рис. 6.

В центральных участках корректоров на рис. 5, *a* и 6, *a* зазоры являются дугами окружностей, а боковые кривые частями эллипсов. Параметры корректоров подобраны таким образом, чтобы исправить aberrации квадрупольного триплета.

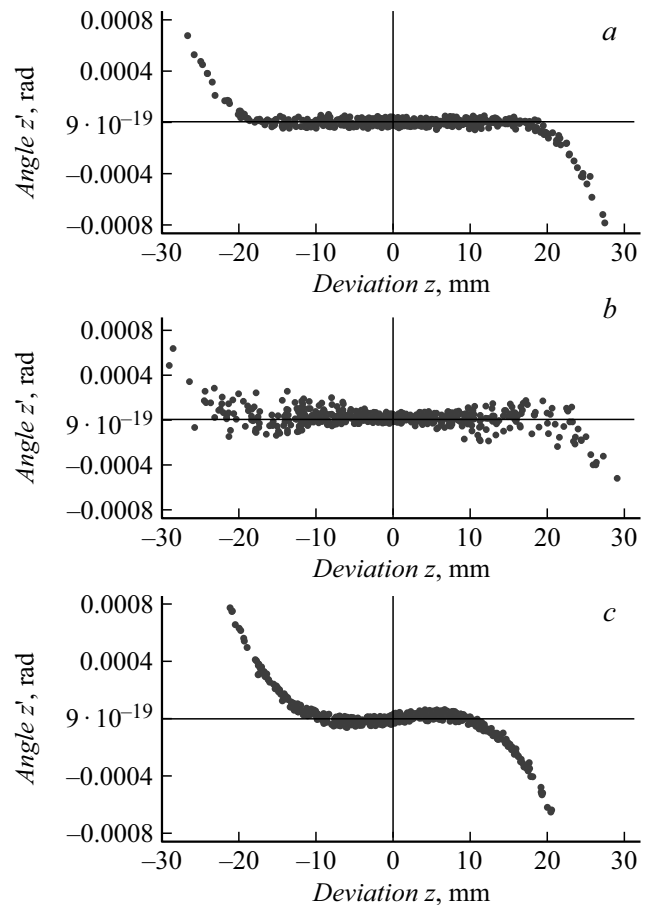
На следующем рисунке приведена фазовая диаграмма пучка, прошедшего октополь с апертурой 100 mm, дли-

ной электродов 100 mm и диаметром электродов 50 mm. С ростом вертикального размера пучка эффективность корректора падает, так как фазовые точки заселяют второй и четвертый квадранты диаграммы рис. 7 и вместо рассеивания частиц в пучке частицы начинают фокусироваться.

Из сравнения диаграмм на рис. 5–7 следует, что корректоры с плоскими электродами более предпочтительны. Поле рассеивания фазовых точек на диаграмме рис. 7 значительно превышает разброс этих точек на рис. 5, *b* и 6, *b*.

Далее рассмотрим оптическую систему, состоящую из ионного источника, вытягивающего электрода, квадрупольного триплета с апертурой 100 mm и корректора, и оценим качество коррекции пучка, прошедшего триплет. Такая система с новым корректором изображена на рис. 8. Этот корректор имеет следующие геометрические параметры: радиус центральной части равен 9.2 см, а радиусы боковых эллипсов  $r_x = 3$  и  $r_z = 5$  mm. Триплет настроен так, что в обеих плоскостях на выходе из триплета пучок приблизительно параллелен.

Корректор с плоскими электродами заменяется октополем для сравнения эффективности их работы.



**Рис. 9.** Фазовые диаграммы: *a* — квадрупольный триплет с новым корректором, имеющим потенциал среднего электрода, равный  $-50$  V; *b* — триплет с октополем; *c* — триплет без коррекции.

Фазовые диаграммы пучков в одном и том же масштабе для соответствующих случаев представлены на рис. 9. Видно, что лучшую линейность обеспечивает корректор с плоскими электродами. И тот и другой корректоры не полностью исправляют углы наклона нескольких крайних траекторий частиц пучка. Число таких частиц невелико, около 4% от общего количества.

### 2.2. Корректоры аббераций для секторных магнитов

В секторных магнитах внешние относительно центра кривизны траектории имеют излишнюю фокусировку, а для внутренних траекторий фокусировка недостаточна. Благодаря этому фазовая диаграмма пучка в фокальной плоскости имеет серповидную форму с концами, направленными в сторону меньших масс. Корректировка заключается в том, чтобы ослабить фокусировку для внешних траекторий и усилить для внутренних. Это достигается установкой корректора перед магнитом, где ширина пучка максимальна.

Протестируем стандартный магнит скандинавского типа, имеющий следующие параметры: радиус поворота 150 см, угол поворота и угол сектора равны 54.7 и 19.2 deg соответственно. Такие магниты действуют во многих лабораториях мира. В России это ПИЯФ (г. Гатчина) и ОИЯИ (г. Дубна). Тест проводится с пучками трех масс 100, 100.05 и 100.1, каждый из которых имеет эмиттанс  $4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  и энергию 30 keV. Ширины пучков равны 40, 60 и 80 mm для указанных масс соответственно. На рис. 10 изображен один из возможных вариантов корректора с плоскими электродами. Это вариант корректора с ускорением ионов в области среднего электрода.

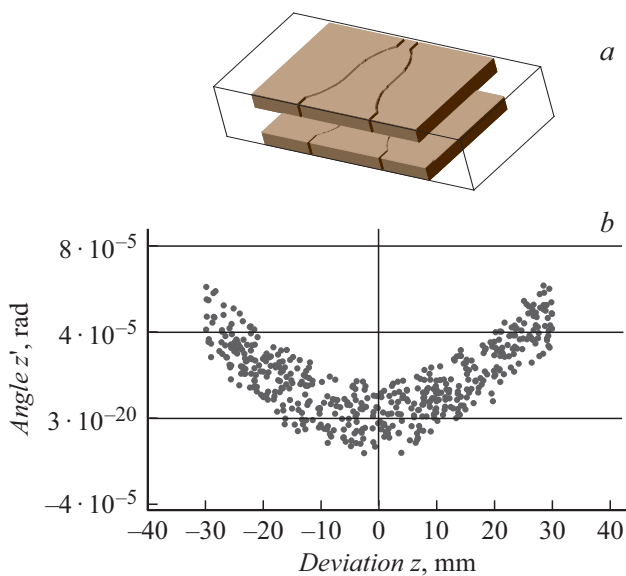


Рис. 10. *a* — корректор секторного магнита с ускоряющим средним электродом, находящимся под потенциалом  $-7 \text{ V}$ ; *b* — фазовая диаграмма.

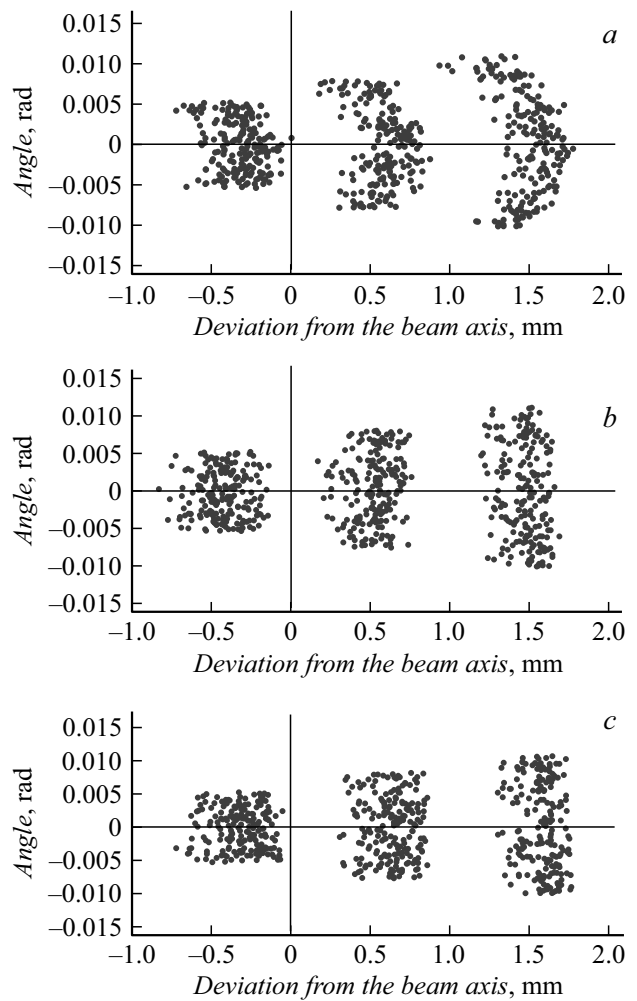


Рис. 11. Фазовые диаграммы пучков в фокальной плоскости секторного магнита: *a* — без коррекции, *b* — с новым корректором, *c* — с гексапольным корректором, имеющим апертуру 100 mm; длина электродов 100 mm и потенциал на электродах  $\pm 0.9 \text{ V}$ .

Это дает возможность наблюдать в фокальной плоскости магнита динамику изменения фазовых диаграмм в зависимости от ширины пучка. Спектр фазовых диаграмм представлен на рис. 11, *a*. Как видно из этого рисунка, ширина фазовой полоски уменьшается с ростом ширины входного пучка, но с этим ростом нарастают абберационные искажения. При свертке по углу этих диаграмм получаются линии спектра масс с затянутыми левыми склонами.

Далее с этими же пучками проводилась коррекция аббераций магнита с новым корректором и гексапольным корректором.

Результаты воздействия корректоров на пучок представлены на рис. 11, *b, c*. Из сравнения диаграмм на этих рисунках следует, что тестируемые корректоры равноценны. Они одинаково хорошо исправляют нелинейность исходных диаграмм (рис. 11, *a*).

## Заключение

Работа выполнена с целью разработки линейно фокусирующей оптики для секторного масс-сепаратора. Разрешающая способность сепараторов при линейной фокусировке прямо пропорциональна ширине пучка на входе в магнит. Задача заключается в создании широких пучков ленточного типа. В работе показано, что такие линейно сфокусированные пучки можно создать на основе модифицированной трансаксиальной линзы, в процессе проектирования которой используется метод фазовых диаграмм.

Этот же метод используется и для разработки корректоров аббераций нового типа. Предложен новый корректор для исправления нелинейностей в электростатических линзах. И этот корректор обладает лучшими характеристиками по сравнению с широко применяемыми октупольными корректорами.

Новый корректор аббераций магнита имеет такие же свойства, как и также широко применяемый гексапольный корректор.

Полученные результаты найдут применение для проектирования масс сепаратора высокого разрешения, описание которого будет представлено в следующей работе.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Lawson J.D.* // The Physics of Charged-Particle Beams. Oxford: Clarendon Press, 1977. [*Лоусон Дж.* // Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980. 438 с.]
- [2] *Wollnik H.* // Optics of charged particles. Academic Press, Inc., 1987. [*Вольник Г.* // Оптика заряженных частиц. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.]
- [3] *Szilagyı M.* // Electron and Ion Optics. NY: Plenum Press, 1988. [*Силадьи М.* // Электронная и ионная оптика. М.: Мир, 1990. 638 с.]
- [4] *Лукашевич В.В.* // ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 3. С. 471–477.