

Электронные и ионные пучки

УДК 621.385.833.22

Численное моделирование аберраций, возникающих в результате дефектов изготовления секступольных и октупольных корректоров

М. О. Зотова, Л. Б. Розенфельд, Б. Н. Васичев
ФГУДП НИИ ЭИО «ГУП НПО "Орион"»

Приведены методика расчета и анализ результатов моделирования влияния неточности изготовления быстродействующих магнитных секступольных и октупольных линз на их электронно-оптические характеристики (указанные линзы используются для коррекции аберраций прецизионных электронно-оптических систем, например, в установках электронной литографии). Оценены величина размытия пучка и величина ошибки позиционирования при изменении координат всех угловых точек корректора случайным образом в пределах заданного поля допуска указанных электронно-оптических элементов.

Электронно-оптические параметры современного прецизионного электронно-лучевого оборудования (например, установок для электронной литографии) теоретически могут быть существенно улучшены путем введения в электронно-оптическую систему корректирующих секступольных и октупольных линз [1]. При работе технологического оборудования возбуждение этих линз должно изменяться с достаточно большой скоростью, что предопределяет использование в качестве корректоров линзы без магнитопровода.

Для обеспечения быстродействия такие системы должны иметь малую индуктивность, что ограничивает число витков в линзе единицами или несколькими десятками. Это заставляет для получения требуемой величины магнитного поля существенно увеличивать ток, протекающий через катушки корректоров, а следовательно, использовать для намотки катушек относительно толстый трудноизгибаемый провод. Вследствие этого форма реальных витков, получаемых при намотке, может существенно отличаться от заданной конструктором формы (например прямоугольной), причем отклонения от заданной геометрии являются, как правило, случайными.

Представлялось интересным провести количественную оценку дополнительных аберраций, возникающих под влиянием деформации витков указанных корректоров. Это может быть сделано путем использования методики, описанной в [2, 3]: сравнением траекторий электронов, прошедших через корректор с идеальной симметрией, с траекториями электронов, прошедших через деформированный корректор.

Для проведения количественной оценки влияния различных дефектов на величину паразитных аберраций в качестве тестовой модели для секступольного корректора была использована конструкция, состоящая из шести прямоугольных рамок с осевой протяженностью 60 мм, расположенных

на цилиндре диаметром 20 мм, зазором между рамками 2° и угловым размером каждой рамки 58° . Аналогично в качестве модели для октупольного корректора использовалась система из восьми рамок с угловым размером каждой рамки 43° . При расчетах предполагалось, что пучок электронов движется вдоль оси линзы (оси z).

Известно, что действие любого электронно-оптического элемента на электроны сводится в первую очередь к изменению углов наклона (α_x и α_y) проекций траектории к оси z , соответственно, на плоскостях XOZ и YOZ . Поэтому мерой дополнительной аберрации могут служить либо разность между углами отклонения $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$ траекторий в идеальном и деформированном корректоре, либо разность координат Δx , Δy точек пересечения указанных траекторий с заданной плоскостью, перпендикулярной оси Z . Здесь $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$, соответственно, ошибки по углам отклонения пучка в направлениях осей X и Y . Очевидно, что ошибка по полному углу отклонения

вычисляется по формуле $\Delta\alpha = \sqrt{\Delta\alpha_x^2 + \Delta\alpha_y^2}$, а смещение реальной траектории от идеальной —

по формуле $\Delta R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$. Очевидно также, что величины $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$, Δx , Δy должны зависеть от координат x_0 , y_0 точки входа электронов в корректор. Поэтому для получения количественной оценки, позволяющей сравнивать влияние дефектов изготовления на величину дополнительных аберраций различных по конструкции корректоров, было предложено оценивать среднеквадратичные ошибки для цилиндрического пучка электронов, движущихся на входе в корректор параллельно оси Z и равномерно распределенных в пределах круга, радиус которого выбирался равным 10 % от радиуса корректора. Для достижения приемлемой точности количественной оценки различных дефектов рассчитывалось от 50 до 150 траекторий.

В реальных электронно-оптических системах через корректор проходят чаще сходящиеся (а иногда расходящиеся) пучки электронов. Очевидно, что влияние дефектов изготовления в этом случае зависит не только от характеристик корректора, но и от того, какую апертуру имеет пучок, проходящий через линзу, каков его радиус в пределах корректора и на каком расстоянии от него находится плоскость фокусировки пучка. Оценка влияния деформаций для случая сходящегося пучка проводилась при одном расстоянии между центром корректора и плоскостью фокусировки $L = 200$ мм (что примерно соответствует рабочему отрезку технологического процесса).

Ввиду того, что точность воспроизведения необходимой конфигурации поля корректора зависит от точности изготовления и позиционирования, соответственно, шести или восьми катушек, каждая угловая точка которых может быть смещена по одной, двум или трем координатам (с учетом направления смещения) 26 способами, оценка влияния каждого возможного дефекта изготовления была достаточно трудоемкой и не представлялась целесообразной. Поэтому для оценки величины паразитных aberrаций была использована программа [2, 3], которая позволяла изменять координаты всех угловых точек корректора случайным образом в пределах заданного поля допусков на изготовление, равного $\pm 0,1$ мм.

Расчет траекторий проводился методом Мерсона с относительной ошибкой 10^{-12} , при этом для вычисления индукции магнитного поля использовался закон Био-Савара.

Были получены семейства зависимостей изменения угла отклонения $\Delta\alpha$ и абсолютной величины смещения ΔR реальной траектории от идеальной для различных деформаций проводников в зависимости от коэффициента возбуждения $k_{ex} = I/\sqrt{U}$ (где I — ток в отдельной рамке, U — ускоряющее напряжение источника электронов). Некоторые результаты численных экспериментов приведены в таблице.

Из приведенных результатов видно, что если ошибки изготовления секступольной линзы рас-

пределяются случайным образом, то при том же допуске $\pm 0,1$ мм и относительно невысоком коэффициенте возбуждения $0,04 \text{ A}/\sqrt{B}$ реальные ошибки по углу могут варьировать в пределах $(1,9-2,7)\cdot 10^{-4}$ рад, а по координате — $(3,5-5,3)\cdot 10^{-5}$ м. Аналогичное численное моделирование октупольной линзы показало, что для нее ошибки по углу могут варьировать в пределах $(2,1-2,8)\cdot 10^{-4}$ рад, а по координате — $(3,8-5,6)\cdot 10^{-5}$ м. При изменении направления тока в корректоре на противоположное ошибка по координатам и по углу может отличаться в несколько раз. Такая несимметрия (связанная с несимметрией изготовления) в технологическом оборудовании приводит к существенной ошибке позиционирования пучка в зависимости от направления тока возбуждения.

Следует отметить, что при прочих равных условиях секступоль более чувствителен к дефектам изготовления, чем октуполь. Сравнение полученных результатов влияния дефектов изготовления на секступоли и октуполи с влиянием аналогичных дефектов на квадрупольные линзы [3] показывает, что квадрупольные линзы при прочих равных условиях примерно в 4 раза более чувствительны к дефектам изготовления, нежели октупольные линзы, и в 2,5 раза более чувствительны, нежели секступольные линзы.

Моделирование режима воздействия корректоров на конус лучей, сходящихся в точку на расстоянии $L = 200$ мм, показало, что при росте коэффициента возбуждения (см. таблицу) наблюдается быстрый рост всех ошибок. Из приведенных результатов видно, что при малых значениях коэффициента возбуждения ($0,04-0,31 \text{ A}/\sqrt{B}$) ошибки по углу и по координате растут пропорционально возбуждению, а при большом возбуждении изменяются нелинейно. Например, для октупольной линзы отклонение различных траекторий конуса от точки фокусировки идеального пучка при коэффициенте возбуждения $0,67 \text{ A}/\sqrt{B}$ и допуске, равном $\pm 0,1$ мм, может достигать 2 мм.

Номер варианта случайного смещения проводников, образующих линзу	$k_{ex}, \text{ A}/\sqrt{B}$	Октупольная линза		Секступольная линза	
		Среднеквадратичная ошибка			
		по углу $\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$, рад	по координате ΔR , мкм	по углу $\Delta\alpha \cdot 10^{-4}$, рад	по координате ΔR , мкм
1	0,04	2,72	55,7	1,91	34,9
1	0,13	8,18	170,3	5,98	107,4
1	0,22	14,3	287,1	10,2	192,2
1	0,31	21,2	424,4	14,3	268,3
1	0,45	21,4	295,1	*	*
1	0,67	32,6	489,8	*	*
2	0,04	2,05	38,2	2,62	53,0
3	0,04	2,63	53,2	2,44	50,6

* При данном возбуждении в секступольной линзе некоторые траектории электронов попадают на обмотки модельной линзы.

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты моделирования воздействия дефекта изготовления на конический пучок с углом при вершине конуса $1 \cdot 10^{-2}$ рад, прошедший через октаупольную линзу, а на рис. 2 — на пучок, прошедший через секступольную линзу.

Из рис. 1 и 2 видно, что величина дополнительных aberrаций также зависит от направления тока в проводниках линзы, что связано с нарушением симметрии поля корректора при его неточном изготовлении.

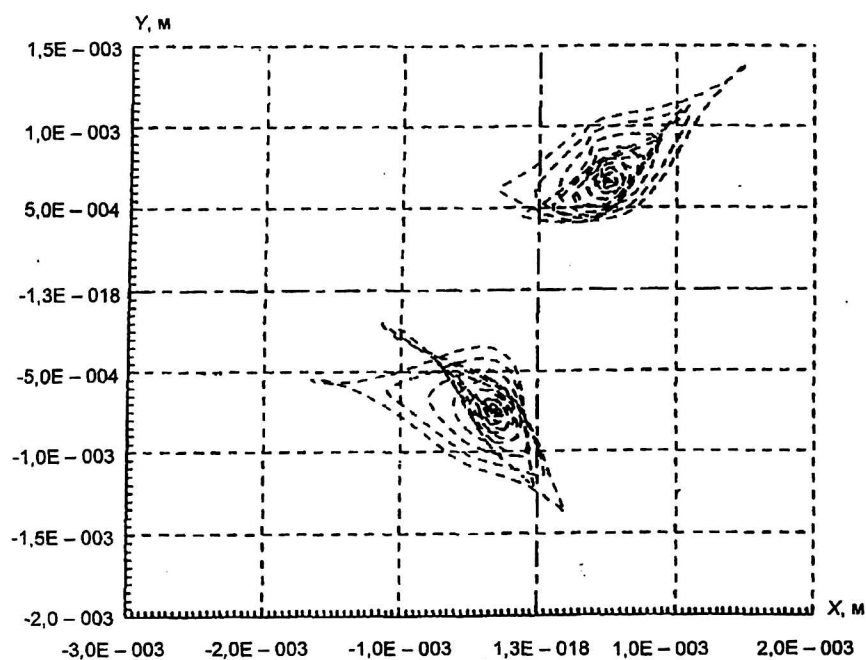


Рис. 1. Отклонение траекторий конического пучка электронов с углом при вершине конуса $1 \cdot 10^{-2}$ рад, прошедших через дефектную октаупольную линзу, от траекторий, прошедших через идеально изготовленную октаупольную линзу, при разных направлениях тока ($k = 0,67 \text{ A}/\sqrt{B}$)

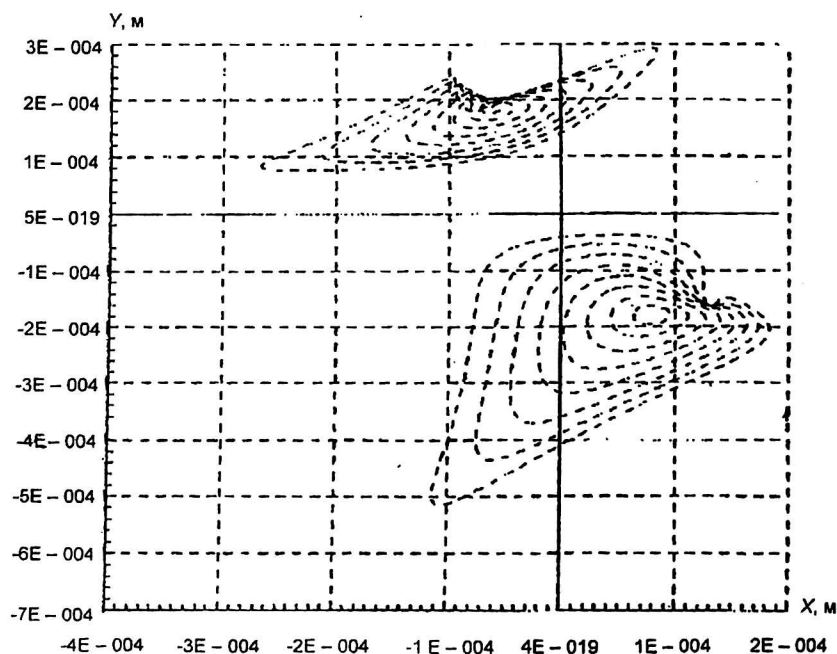


Рис. 2. Отклонение траекторий конического пучка электронов с углом при вершине конуса $1 \cdot 10^{-2}$ рад, прошедших через дефектную секступольную линзу, от траекторий, прошедших через идеально изготовленную секступольную линзу, при разных направлениях тока ($k = 0,22 \text{ A}/\sqrt{B}$)

Выводы

1. Предложены критерии для оценки влияния различных видов дефектов изготовления секступольных и октупольных линз на их оптические свойства для цилиндрического и конического пучков, входящих в линзы. Рассчитаны отклонения реальных траекторий пучков, прошедших через деформированный корректор, от траекторий, прошедших через идеально изготовленный корректор.

2. Показано, что при случайном распределении ошибок по всем координатам проводников, формирующих поле мультипольного корректора, абсолютная ошибка отклонения по углу может

превышать $3 \cdot 10^{-3}$ рад, а среднеквадратичная ошибка позиционирования пучка — достигать десятых долей миллиметра при большом коэффициенте возбуждения октупольной и секступольной линз.

Литература

1. Хокс П., Каспер Э. // Основы электронной оптики. — М., 1993. Т. 2. С. 474.
2. Розенфельд Л. Б., Васичев Б. Н., Зотова М. О. // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. №7. С. 1283.
3. Розенфельд Л. Б., Васичев Б. Н., Зотова М. О. // Там же. 2000. Т. 64. №8. С. 1579.

Numerical modeling of the aberrations arising as a result of manufacturing defects sextupole and octupole correctors

M. O. Zotova, L. B. Rozenfel'd, B. N. Vasichev
Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

The calculations methods and analysis of results of modeling the influence of tolerances on the electron-optics parameters for high-speed magnetic sextupole and octupole lens are presented. The value of the beam defects as result of the shift, the inclination and variation of the length and radius for magnetic sextupole and octupole lens are estimated.