

01;10

## Компьютерное моделирование шестиполюсных корректоров аберраций

© Л.А. Баранова,<sup>1</sup> F.H. Read,<sup>2</sup> D. Cubric<sup>3</sup><sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> School of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK<sup>3</sup> Shimadzu Research Laboratory (Europe), Trafford Wharf Road, Manchester M17 1GP, UK  
e-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 27 мая 2008 г.)

Исследованы особенности применения шестиполюсных электронно-оптических элементов для коррекции сферической аберрации объектива низковольтного растрового электронного микроскопа. По сравнению с известными и хорошо изученными квадрупольно-октупольными корректорами шестиполюсные системы конструктивно более просты, их легче настроить и они менее чувствительны к погрешностям изготовления и нестабильности питания.

Рассмотрены два типа шестиполюсных корректоров, имеющих следующие конфигурации: *RHRHR* и *HRRH* (*R* — осесимметричная линза, round lens, и *H* — шестиполюсник, hexapole). Обе конфигурации обеспечивают существенное уменьшение сферической аберрации объектива электронного микроскопа, но не корректируют хроматической аберрации. Вторая конфигурация обладает весьма существенными преимуществами по сравнению с первой: она имеет более простую конструкцию и систему питания, а также допускает более простую процедуру настройки.

Как показали исследования, дополнительными преимуществами второй конфигурации являются более низкие потенциалы на электродах, более высокая точность коррекции аберраций и меньшая чувствительность к погрешностям изготовления. С другой стороны, хроматическая аберрация второй конструкции несколько больше, чем первой.

PACS: 02.70.Pt, 41.85.Gy, 41.85.Ne, 68.37.Hk

### Введение

Как известно, разрешающая способность электронных микроскопов в первую очередь ограничена сферической аберрацией третьего порядка и хроматической аберрацией первого порядка объективной линзы. Один из возможных путей улучшения качества фокусировки заключается в использовании мультипольных электронно-оптических элементов для коррекции указанных аберраций. С тех пор как Шерцер (Scherzer) опубликовал свою классическую работу [1], в которой предложил корректировать аберрации с помощью мультипольных систем, было предпринято большое количество попыток оснастить электронный микроскоп квадрупольно-октупольным корректором, который в принципе, позволяет скомпенсировать как сферическую, так и хроматическую аберрации. Первые эксперименты, однако, не были успешными, поскольку, как оказалось, качество фокусировки микроскопов, использовавшихся в тех экспериментах, было ограничено не столько электронно-оптическими аберрациями, сколько погрешностями изготовления и юстировки, а также нестабильностью питания.

Существенное улучшение разрешения низковольтного сканирующего электронного микроскопа в результате применения квадрупольно-октупольного корректора было достигнуто лишь в 1995 г. [2]. Прогресс обусловлен в

первую очередь применением компьютеров при изготовлении и юстировке корректирующих элементов, а также тем, что значительные успехи достигнуты в области стабилизации электрических и магнитных полей. Поэтому в последнее время такой способ коррекции аберраций вновь привлек внимание исследователей [3,4].

Следует, однако, отметить, что процедура настройки квадрупольно-октупольного корректора чрезвычайно сложна и требует незаурядного мастерства. Кроме того, требования к точности изготовления и стабильности источников питания чрезвычайно высоки. Вместе с тем в тех случаях, когда доминирующей аберрацией является сферическая и, следовательно, нет надобности корректировать хроматическую, можно применить гораздо более простой корректор, основанный на шестиполюсных электронно-оптических элементах. Шестиполюсные корректоры исследовались в целом ряде работ с точки зрения их применения как в растровых, так и в просвечивающих электронных микроскопах [5–10]. В работе [10] была экспериментально подтверждена эффективность использования шестиполюсного корректора, установленного в двухсоткиловольтный просвечивающий электронный микроскоп.

В настоящей работе проведено детальное исследование, базирующееся на компьютерном моделировании, шестиполюсных корректоров, предназначенных для растровых электронных микроскопов. В частности, была

подробно исследована коррекция сферической аберрации в низковольтном растровом электронном микроскопе с магнитной объективной линзой, имеющей следующие характеристики: фокусное расстояние  $f = 2 \text{ mm}$ , коэффициент сферической аберрации  $C_s = 1.1 \text{ mm}$  и коэффициент хроматической аберрации  $C_c = 1 \text{ mm}$ .

Кроме того, аналогичные исследования были проведены для аналитического растрового микроскопа со следующими параметрами: фокусное расстояние объектива  $f = 17 \text{ mm}$ , коэффициент сферической аберрации  $C_s = 135 \text{ mm}$  и коэффициент хроматической аберрации  $C_c = 23 \text{ mm}$ . Оба прибора работают в диапазоне значений энергии от 1 до 10 keV. Исследованы два типа корректоров: предложенный Крю (Crewe) и Копфом (Korf) [5,6], и предложенный Розэ (Rose) [7,8]. Все расчеты проведены с использованием программы СРОЗД [11] и ограничены электростатическими системами.

## 1. Принцип коррекции

Отдельный шестиполосный элемент образован шестью электродами, расположенными симметрично вокруг оптической оси. К электродам приложены чередующиеся потенциалы  $\pm V$ . Распределение потенциала в окрестности оптической оси шестиполосника в том случае, когда плоскость  $yz$  является плоскостью симметрии, дается выражением

$$\phi(x, y, z) = \frac{T(z)V}{R^3} (y^3 - 3x^2y) + O(5) + \dots \quad (1)$$

Здесь  $T(z)$  — коэффициент, определяемый формой электродов шестиполосника,  $R$  — радиус апертуры.

Уравнения траектории в паракиальном приближении имеют вид

$$\begin{aligned} x'' &= -2k(z)xy + O(4) + \dots, \\ y'' &= k(z)(x^2 - y^2) + O(4) + \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

где дифференцирование производится по координате  $z$ , а коэффициент  $k(z)$  характеризует оптическую силу шестиполосника, нормализованную на энергию электронного пучка  $E = -e\Phi$ :

$$k(z) = \frac{3}{2} \frac{T(z)V}{R^3\Phi}. \quad (3)$$

Как следует из уравнения (2), в шестиполоснике не существует фокусировки первого порядка, его основное действие пропорционально квадрату поперечных координат, а низшие аберрации имеют третий порядок малости. Следовательно, для того чтобы использовать шестиполосники в корректорах сферической аберрации третьего порядка, необходимо прежде всего скомпенсировать эффекты второго порядка малости (квадратичные).

Аберрационный анализ, проведенный в работах [5–7], показал, что система шестиполосников может работать как корректор сферической аберрации третьего порядка только в том случае, если удовлетворены следующие условия.

1. Система содержит по крайней мере два идентичных шестиполосника одинаковой азимутальной ориентации.

2. Система сконструирована и подключена к источникам питания таким образом, что она формирует промежуточное изображение точно посередине между двумя шестиполосниками.

3. Между шестиполосниками помещена осесимметричная линза, которая отображает один шестиполосник на другой.

Удовлетворение указанных условий гарантирует обращение в нуль аберраций второго порядка в пучке электронов, выходящем из корректора. Аберрация третьего порядка в выходящем пучке имеет осевую симметрию, а ее знак противоположен знаку сферической аберрации третьего порядка объектива электронного микроскопа. Величину сферической аберрации корректора можно регулировать, меняя потенциалы на электродах шестиполосников.

## 2. Геометрия корректора

На рис. 1 и 2 схематически изображены две различные конфигурации шестиполосных систем, удовлетворяющих вышеперечисленным условиям. Первая схема была предложена в работе [6], вторая — в [8]. Корректор работает как телескопическая система, преобразующая параллельный пучок электронов на входе в систему в параллельный пучок того же диаметра на выходе.

Конфигурация 1 состоит из двух шестиполосников и трех осесимметричных линз, две из которых ограничивают систему на входе, а третья расположена в центре корректора. Первая осесимметричная линза (входная линза) формирует кроссовер пучка точно посередине между двумя шестиполосниками. Последняя осесимметричная линза (выходная линза) возвращает расходящийся электронный пучок в параллельный. Следовательно,

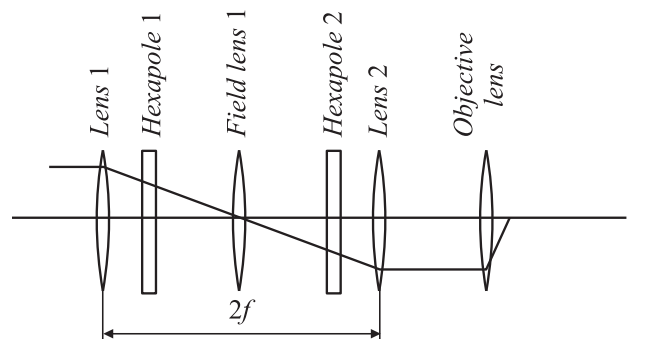
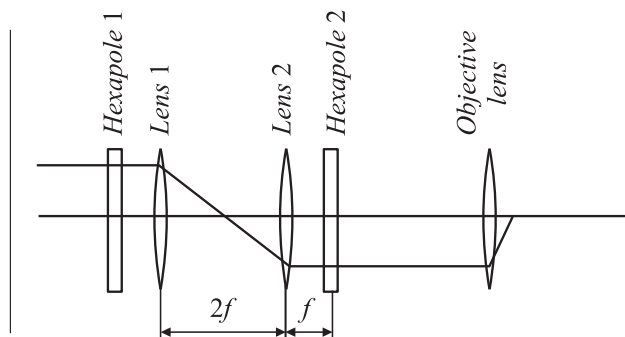


Рис. 1. Схематический вид шестиполосного корректора, конфигурация 1.



**Рис. 2.** Схематический вид шестиполюсного корректора, конфигурация 2.

расстояние между центрами первой и последней осесимметричных линз приблизительно равно удвоенному фокусному расстоянию одной линзы ( $2f$ ). Центральная осесимметричная линза (полевая линза) помещается точно в центре корректора, и ее фокусное расстояние настраивается таким образом, чтобы она отображала один шестиполюсник на другой.

Конфигурация 2 состоит из двух шестиполюсников и двух идентичных осесимметричных линз, расположенных симметрично между шестиполюсниками. Расстояние между центрами осесимметричных линз равно удвоенному фокусному расстоянию одной линзы ( $2f$ ), а расстояние между центрами шестиполюсников равно четырем фокусным расстояниям осесимметричной линзы ( $4f$ ). Две осесимметричные линзы в схеме 2 выполняют те же функции, что и три линзы в схеме 1: они формируют кроссовер пучка посередине между шестиполюсниками и отображают один шестиполюсник на другой.

Нами было проведено компьютерное моделирование шестиполюсных корректоров, образованных соосными цилиндрическими электродами. Два цилиндра, разделенные на шесть равных частей каждый, образуют шестиполюсные элементы. На их электроды, представляющие собой цилиндрические сегменты, подаются чередующиеся потенциалы  $\pm V$ . Каждая осесимметричная линза образована тремя соосными цилиндрами, причем внешние цилиндры заземлены, а на внутренний подается регулируемый потенциал.

Компьютерное моделирование обеих конфигураций шестиполюсных корректоров было проведено с помощью программы СРОЗД [11], разработанной на основе метода граничных элементов. Для получения надежных результатов расчеты распределения потенциала и интегрирование траекторий проводились с наивысшей точностью, предоставляемой программой. Максимальная погрешность при расчете распределения потенциала не превышала  $10^{-6}$ , при интегрировании траекторий —  $10^{-5}$ . В процессе работы выяснилось, что для достижения максимальной точности необходимо выполнение

следующего условия: разбиение электродов на сегменты, которое в процессе вычислений осуществляет программа, должно выполняться так, чтобы система сегментов в целом имела шесть плоскостей симметрии относительно оптической оси. Выполнение этого условия поддерживалось автоматически с помощью специальной подпрограммы в СРОЗД.

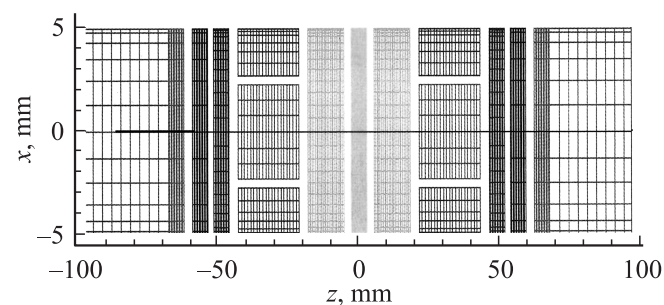
### 3. Настройка потенциалов осесимметричных линз

На рис. 3 показано сечение  $xz$  первой конфигурации шестиполюсного корректора, электроды которого разделены на сегменты программой СРОЗД. Диаметр системы составляет 10 мм и общая длина равна 120 мм. Три коротких цилиндра слева образуют входную осесимметричную линзу и три аналогичных цилиндра справа образуют выходную осесимметричную линзу. Третья осесимметричная находится в центре корректора, по обе стороны от нее, симметрично относительно центра, расположены два идентичных шестиполюсника.

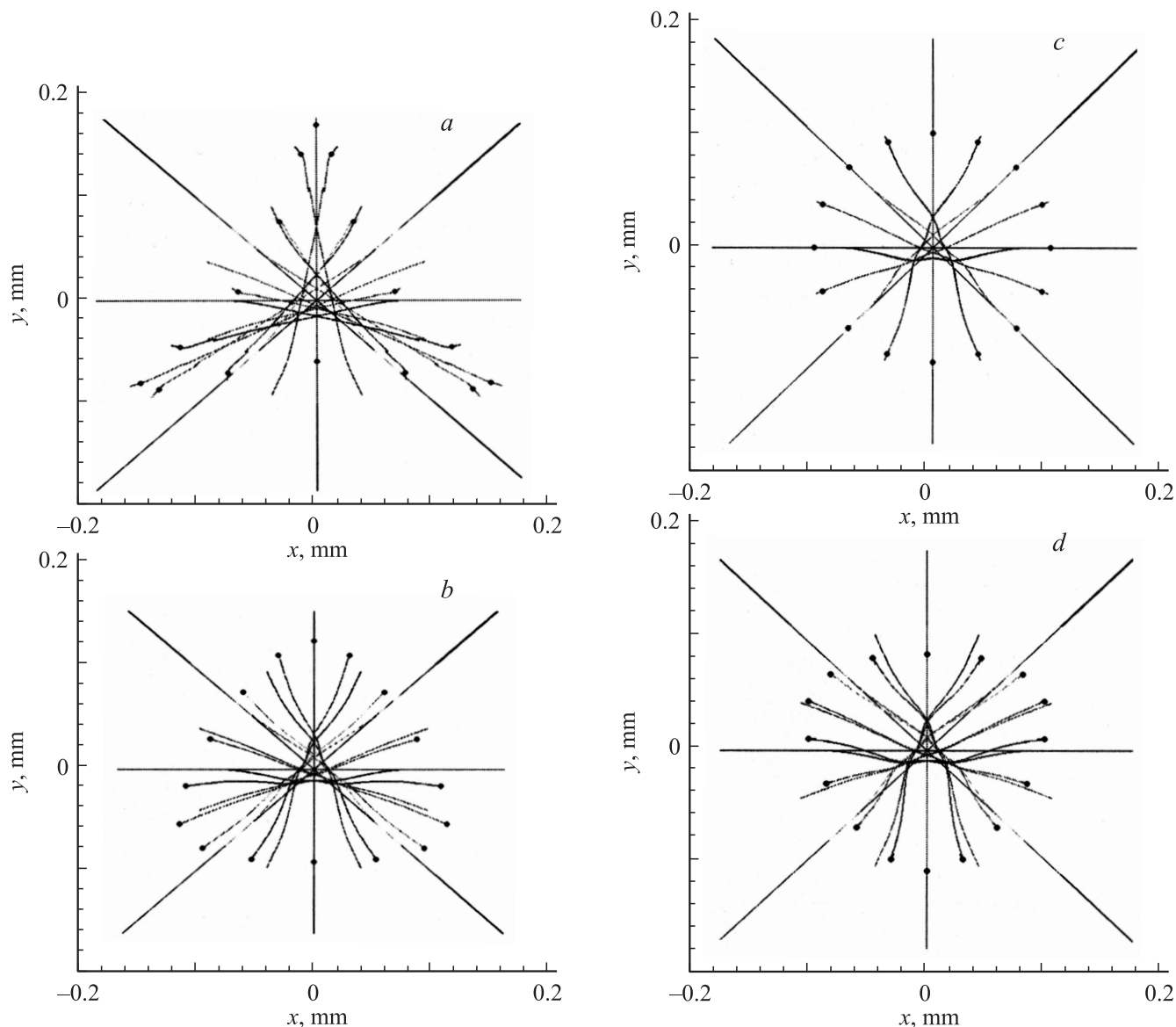
Настройку электрического питания корректора следует начинать с настройки потенциалов, подаваемых на входную и выходную осесимметричные линзы. Эти потенциалы равны друг другу и подбираются таким образом, чтобы параллельный пучок электронов, входящий в корректор, фокусировался в центре корректора и вновь превращался в параллельный пучок на выходе из системы. На этой стадии процедуры настройки потенциалы всех остальных элементов корректора должны быть равны нулю.

На следующем этапе подбирается потенциал центральной (полевой) осесимметричной линзы. Поскольку величина этого потенциала не зависит от потенциалов шестиполюсников, последние могут иметь произвольную величину на этой стадии настройки. Когда потенциал полевой линзы равен нулю, корректор вносит довольно значительные аберрации четвертого порядка, приосекая составляющая которых имеет трехкратную симметрию [7].

На рис. 4, а показано сечение электронного пучка в этом случае. Черные точки обозначают точки пересечения электронных траекторий с контрольной плоскостью



**Рис. 3.** Продольное сечение шестиполюсного корректора, смоделированное программой СРОЗД (конфигурация 1).



**Рис. 4.** Проекция электронных траекторий на контрольную плоскость, расположенную за корректором перпендикулярно оптической оси. Точками обозначены места пересечений электронных траекторий с контрольной плоскостью. *a* — потенциал полевой линзы равен нулю; *b, c* и *d* — потенциал полевой линзы принимает последовательно значения 3, 4.68 и 6 (за единицу принят ускоряющий потенциал электронного пучка).

стью, расположенной перпендикулярно оптической оси на некотором расстоянии за корректором. Электронный пучок, имеющий круглое сечение на входе в корректор, на выходе существенно отклоняется от осевой симметрии и становится симметричным относительно трех плоскостей, расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу.

На рис. 4, *b-d* проиллюстрирован процесс настройки потенциала полевой линзы. Рис. 4, *c* соответствует правильно подобранному потенциалу, при котором изначально осесимметричный пучок после прохождения корректора остается осесимметричным. Было определено, что при данной геометрии корректора необходимая

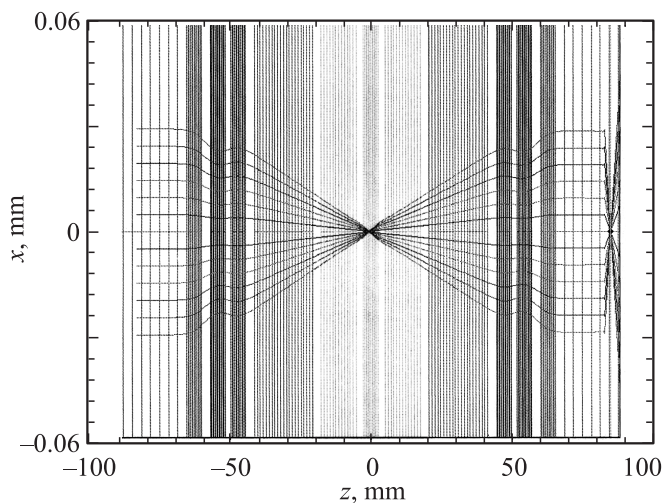
величина потенциала на центральном электроде полевой линзы равна  $V_f = 4.68$  в единицах потенциала  $\Phi$ .

С практической точки зрения найденный потенциал может оказаться слишком высоким. В этом случае можно подать замедляющий потенциал на центральный электрод полевой линзы, что не приведет к сколь угодно заметному увеличению aberrаций в сравнении с ускоряющим потенциалом, поскольку электронные траектории пересекают оптическую ось внутри полевой линзы. Расчеты показали, что замедляющий потенциал  $V_f = -0.98$ , поданный на полевую линзу, эквивалентен ускоряющему потенциалу  $V_f = 4.68$  и производит то же самое действие.

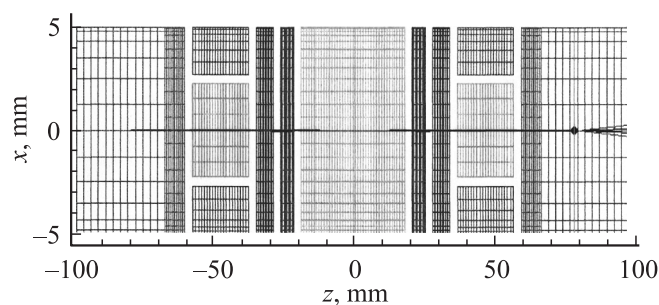
На рис. 5 показаны электронные траектории в конфигурации 1 в том случае, когда потенциалы всех осесимметричных линз настроены нужным образом.

Настройка потенциалов осесимметричных линз в конфигурации 2 проще, чем аналогичная процедура в конфигурации 1, поскольку требуется подобрать только один потенциал за корректором, потенциалы осесимметричных линз, которые должны быть равны друг другу, настраиваются таким образом, чтобы координаты траектории  $x_i$  и  $y_i$  в контрольной плоскости были точно равны координатам  $x_0$  и  $y_0$  той же самой траектории на выходе в систему. Такая настройка гарантирует, что корректор формирует параллельный выходящий пучок из параллельного входящего пучка, а также то, что точно в центре корректора формируется промежуточный фокус. Благодаря симметричной геометрии корректора это автоматически гарантирует, что корректор отображает один шестиполосник на другой.

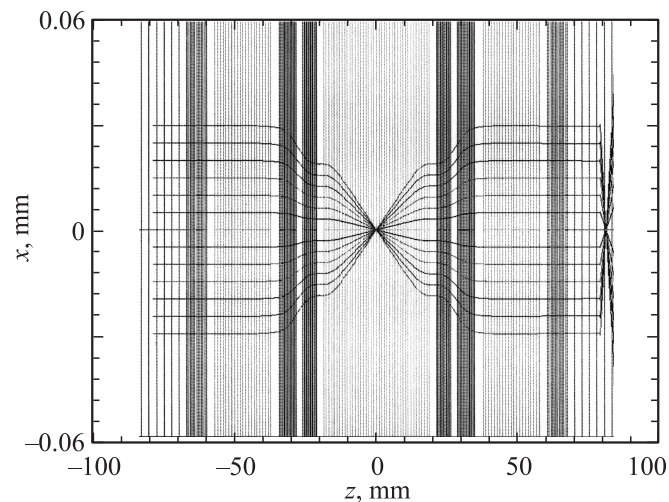
На рис. 6 показано продольное сечение  $xz$  второй конфигурации шестиполосного корректора, электроды которого разделены на сегменты программой (CPO3D). Базовые размеры системы такие же, как в конфигурации шестиполосного корректора, электроды которого разде-



**Рис. 5.** Электронные траектории в конфигурации 1, построенные программой CPO3D. Объектив микроскопа заменен искусственной тонкой линзой с фокусным расстоянием  $f = 2$  mm.



**Рис. 6.** Продольное сечение шестиполосного корректора, смоделированное программой CPO3D (конфигурация 2).



**Рис. 7.** Электронные траектории в конфигурации 2, построенные программой CPO3D. Объектив микроскопа заменен искусственной тонкой линзой с фокусным расстоянием  $f = 2$  mm.

лены на сегменты программой CPO3D. Базовые размеры системы такие же, как в конфигурации 1.

Рис. 7 иллюстрирует электронные траектории в сечении  $xz$  конфигурации 2.

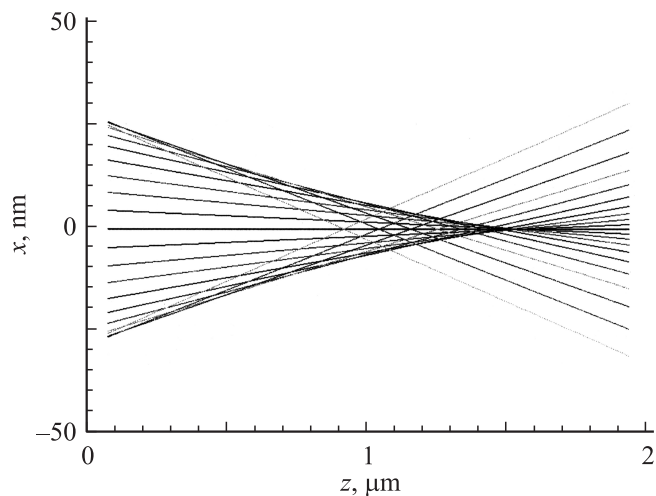
#### 4. Коррекция сферической аберрации

Коррекция сферической аберрации осуществляется путем настройки потенциалов шестиполосников. Процедура коррекции одинакова для обеих конфигураций корректора. В процессе компьютерного моделирования объектов микроскопа был заменен искусственной тонкой линзой с фокусным расстоянием и коэффициентом сферической аберрации, равными соответствующим параметрам объектива. На практике потенциалы шестиполосников настраиваются так, чтобы минимизировать размер электронного зонда в плоскости образца. В случае компьютерного моделирования проще следить не за пятном в фокальной плоскости объектива, а за  $xz$ - и  $yz$ -проекциями пучка и заставить приосевые и далекие от оси траектории пучка сфокусироваться в одной и той же точке на оси  $z$ , что означает, что сферическая аберрация равна нулю.

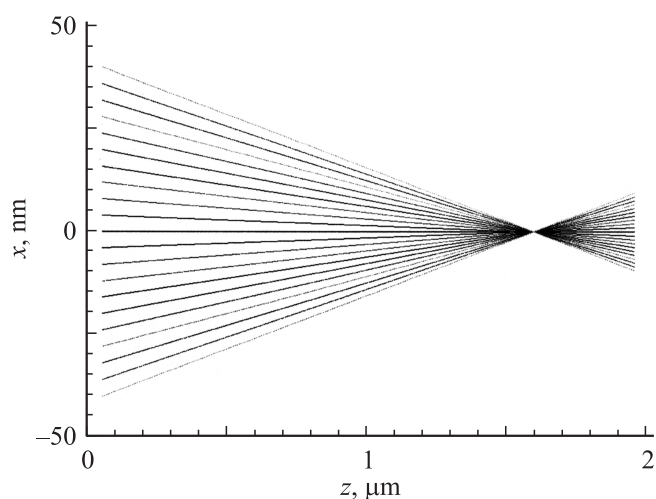
На рис. 8 показано продольное сечение электронного пучка вблизи фокальной плоскости объектива в том случае, когда корректор отключен.

На рис. 9 представлено сечение того же пучка в случае, когда корректор включен и потенциалы шестиполосников подобраны таким образом, что они корректируют сферическую аберрацию третьего порядка всей системы в целом — „объектив плюс корректор“.

Видимо, что кроссовер пучка в фокальной плоскости значительно уменьшился — это доказывает эффективность коррекции.



**Рис. 8.** Структура электронного пучка вблизи фокальной плоскости объектива при выключенном корректоре.



**Рис. 9.** Структура скорректированного электронного пучка вблизи фокальной плоскости объектива.

Расчеты показали, что при начальном диаметре пучка в  $100\ \mu\text{m}$ , что соответствует апертурному углу  $\alpha = 0.025\ \text{rad}$ , размер пятна в фокальной плоскости объектива сокращается в результате коррекции на порядок. Поскольку в данном примере не учитывались электронная дифракция и хроматическая aberrация, диаметр зонда в скорректированной системе определяется геометрическими aberrациями высших порядков.

## 5. Хроматическая aberrация

Поскольку, как уже указывалось, шестиполосники не обладают фокусировкой первого порядка (первичное действие шестиполосника имеет второй порядок малости), они не оказывают воздействия на приосевую хроматическую aberrацию. Осесимметричные линзы, входящие в систему корректора, вносят вклад в хро-

матическую aberrацию, но поскольку эти линзы гораздо слабее объектива микроскопа, их вклад в суммарную aberrацию весьма незначителен. Это положение подтверждается результатами численных расчетов, которые показывают, что увеличение хроматической aberrации, обусловленное корректором, очень мало и может быть вызвано не только непосредственно хроматической aberrацией осесимметричных линз, входящих в корректор, но также и погрешностями расчетов, возросшими в связи с усложнением системы.

## 6. Сравнение двух конфигураций

В табл. 1 представлены некоторые результаты численных расчетов, иллюстрирующие параметры скорректированной системы „объектив + корректор“. Предполагается, что объектив микроскопа имеет следующие характеристики: фокусное расстояние  $f = 2\ \text{mm}$ , коэффициент сферической aberrации  $C_s = 1.1\ \text{mm}$  и коэффициент хроматической aberrации  $C_c = 1\ \text{mm}$ . Энергия электронного пучка равна  $1\ \text{keV}$ . Эти цифры характерны для низковольтных растровых электронных микроскопов.

Из табл. 1 видно, что увеличение хроматической aberrации при включении корректора более значительно в конфигурации 2, поскольку две осесимметричные линзы этой конфигурации сильнее, чем входная и выходная линза конфигурации 1 (если обе конфигурации имеют одинаковую длину). Вкладом в хроматическую aberrацию полевой линзы конфигурации 1 можно пренебречь (хотя это и достаточно сильная линза), поскольку внутри этой линзы электронный пучок движется вблизи оптической оси. Очевидно, что замедляющий потенциал, поданный на осесимметричную линзу, вызывает большую хроматическую aberrацию, чем ускоряющий, поэтому в конфигурации 2 рекомендуется использовать ускоряющий потенциал. В этом случае обе конфигурации имеют примерно одинаковую хроматическую aberrацию, однако потенциал, поданный на осесимметричные линзы конфигурации 2, в два раза выше аналогичного потенциала в конфигурации 1.

В табл. 2 представлены результаты численных расчетов для скорректированной системы „объектив + корректор“ в случае, когда объектив микроскопа характеризуется следующими параметрами: фокусное расстояние  $f = 17\ \text{mm}$ , коэффициент сферической aberrации  $C_s = 135\ \text{mm}$  и коэффициент хроматической aberrации  $C_c = 23\ \text{mm}$ . Энергия электронного пучка равна  $7\ \text{keV}$ .

Здесь также увеличение хроматической aberrации, вызванное корректором, проявляется сильнее в конфигурации 2, чем в конфигурации 1.

Проведенное исследование показало, что за исключением незначительного роста хроматической aberrации конфигурация 2 обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с конфигурацией 1.

**Таблица 1.** Электрические потенциалы на электронно-оптических элементах шестиполосного корректора, а также суммарный коэффициент хроматической аберрации в скорректированной системе „объектив + корректор“ (первый вариант)

Конфигурация	Потенциал входной и выходной линз, kV	Потенциал полевой линзы, kV	Потенциалы шестиполосников, kV	Коэффициент хроматической аберрации, $C_c$ , mm
1	+1.483	+4.68	0.68	1.1
1	+1.483	-0.98	0.68	1.1
2	-0.872		0.25	2.1
2	+2.958		0.23	1.2

**Таблица 2.** Электрические потенциалы на электронно-оптических элементах шестиполосного корректора, а также суммарный коэффициент хроматической аберрации в скорректированной системе „объектив + корректор“ (второй вариант)

Конфигурация	Потенциал входной и выходной линз, kV	Потенциал полевой линзы, kV	Потенциалы шестиполосников, kV	Коэффициент хроматической аберрации, $C_c$ , mm
1	+3.76	-3.84	0.50	27
2	+4.3		0.04	30

1. Конфигурация 2 проще конструктивно, она содержит меньше элементов и требует настройки меньшего числа независимых потенциалов, чем конфигурация 1.

2. Процедура настройки потенциалов в конфигурации 2 существенно проще и, следовательно, может быть проведена с большей точностью.

3. Абсолютная величина потенциалов, подаваемых на шестиполосники, меньше в конфигурации 2.

Компьютерное моделирование показало также, что конфигурация 2 обеспечивает лучшее качество коррекции сферической аберрации, что приводит к меньшему диаметру электронного зонда. Эта система менее чувствительна к погрешностям расчета и следовательно, будет менее чувствительна к механическим погрешностям изготовления.

## Заключение

Шестиполосные корректоры дают возможность существенно уменьшить сферическую аберрацию объектива электронного микроскопа (в типичных случаях — на порядок), что позволяет рекомендовать их к использованию в электронных микроскопах для улучшения эксплуатационных характеристик приборов.

Шестиполосные корректоры конструктивно проще квадрупольно-октупольных и, что гораздо важнее, настройка электрических потенциалов в шестиполосных системах далеко не так сложна, как аналогичная процедура в квадрупольно-октупольных корректорах.

Благодаря относительной конструктивной простоте шестиполосные корректоры гораздо менее чувствительны и погрешностям изготовления и нестабильности питания.

К недостаткам шестиполосных корректоров следует отнести невозможность коррекции хроматической аберрации, поэтому необходимо принимать все возможные меры к уменьшению энергетического разброса в электронном пучке.

## Список литературы

- [1] Scherzer O. // *Optik*. 1947. Vol. 2. P. 114.
- [2] Zach J., Haider M. // *Nucl. Instrum. Meth. A*. 1995. Vol. 363. P. 316.
- [3] Honda K., Takashima S. // *JEOL News*. 2003. Vol. 38. N 1. P. 36.
- [4] Uno Sh., Honda K., Nakamura N., Matsuya M., Zach J. // *Optik*. 2005. Vol. 116. P. 438.
- [5] Crewe A.V., Kopf D. // *Optik*. 1980. Vol. 55. P. 1.
- [6] Crewe A.V. // *Optik*. 1984. Vol. 69. P. 24.
- [7] Rose H. // *Nucl. Instrum. Meth.* 1981. Vol. 187. P. 187.
- [8] Rose H. // *Optik*. 1990. Vol. 85. P. 19.
- [9] Shao Zh. // *Optik*. 1988. Vol. 80. P. 61.
- [10] Haider M., Braunshausen G., Schwan E. // *Optik*. 1995. Vol. 99. P. 167.
- [11] Read F.H., Bowring N.J. // CPO programs ([www.electronoptic.com](http://www.electronoptic.com)).