

УДК 621.385;833.22

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ КОНФОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Б. Н. Васичев, Е. П. Михальцов

Московский государственный институт электроники и математики
(Технический университет), Москва, Россия

Л. Б. Розенфельд

ГП Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики, Москва, Россия

Рассмотрены условия снижения полевых aberrаций в конфокальных системах, образованных магнитными линзами. Показаны условия снижения в симметричных системах aberrации изотропной и анизотропной дисторсии и комы до нуля, а в системах, образованных подобными линзами, условия минимизации влияния указанных aberrаций. Проведена количественная оценка зависимости aberrаций от наложения полей линз.

При разработке различных электронно-оптических систем (ЭОС) в ряде случаев применяются конфокальные системы линз, то есть системы из двух линз, в которых задняя фокальная плоскость первой линзы совмещена с передней фокальной плоскостью второй линзы (рис. 1). Если в передней фокальной плоскости первой линзы расположить предмет, то в задней фокальной плоскости второй линзы будет изображение с уменьшением, равным отношению фокусных расстояний первой и второй линзы.

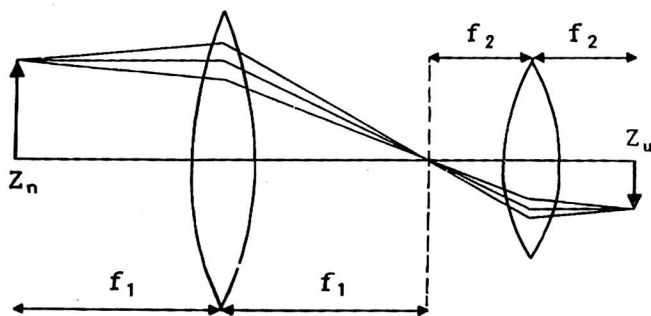


Рис. 1. Оптическая схема конфокальной системы

В световой оптике расчет такой системы, при известных координатах фокальной плоскостей каждой линзы, достаточно прост. В электронной оптике, при использовании магнитных линз, знание оптических характеристик каждой из линз не позволяет определить характеристики системы в случае, если расстояние между линзами сравнимо с диаметрами каналов в полюсных наконечниках линз.

В этом случае и возникают некоторые особенности расчета конфокальных систем, вызванные тем, что поля магнитных линз имеют, строго говоря, бесконечную протяженность (рис. 2). При сближении линз взаимное наложение полей приводит к тому, что каждая линза становится несимметричной. Соответственно изменяется положение передней и задней фокальных плоскостей (см. рис. 1), т. е. нарушится условие их конфокальности. Следовательно, расположение элементов системы, определенное без учета наложения полей, не будет оптимальным.

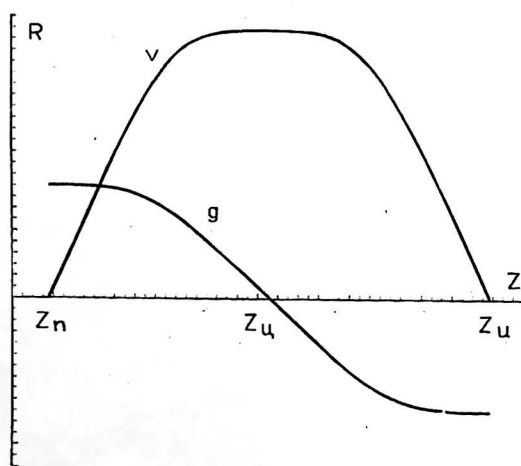


Рис. 2. Распределение осевой компоненты магнитной индукции в системе из двух магнитных линз

Для оценки влияния наложения полей были рассмотрены aberrации двух видов конфокальных систем: образованных либо двумя одинаковыми, либо двумя подобными магнитными линзами. При этом предполагалось, что ампервитки возбуждения линзы одинаковы, а направления магнитных полей противоположны, что обеспечивает нулевой угол поворота изображения в конфокальной системе магнитных линз.

Основными aberrациями при большом поле зрения электронно-оптической системы являются изотропная и анизотропная дисторсия и кома, определяемые, соответственно, коэффициентами E , e и F . Для исследования aberrаций конфо-

кальной системы воспользуемся выражениями абберационных коэффициентов для магнитного поля, причем удобно рассматривать коэффициенты, в которых исключены старшие производные осевого распределения поля [1].

$$E = \frac{\eta}{16U} \left\{ \int_{z_n}^{z_n'} [\Xi \nu g^3 - gg'(\Delta + \nu'g)B^2] dz + \frac{1}{2} [\nu'(z)g^3(z)B^2(z)] \Big|_{z_n}^{z_n'} \right\};$$

$$e = \sqrt{\frac{\eta}{8U}} \frac{1}{4} \left\{ \int_{z_n}^{z_n'} \Delta \left[\frac{3}{8} \frac{\eta}{U} B^3 g^2 + B(g')^2 \right] dz + \left[g^2 (B\nu'g' - \frac{\Delta B'}{2}) \right] \Big|_{z_n}^{z_n'} \right\};$$

$$F = \frac{\eta}{16U} \left\{ \int_{z_n}^{z_n'} [\Xi \nu^3 g - \nu(\nu')^2 g B^2] dz \right\},$$

причем $\Xi = \frac{3}{8} \frac{\eta B^4}{U} + (B')^2$, $\Delta = \nu'g - g'\nu$,

где z_n, z_n' — осевые координаты плоскости предмета и изображения;

B, B' — соответственно, магнитная индукция и ее производная по Z ;

U — ускоряющее напряжение.

Также в формулах для коэффициентов аббераций используются два стандартных линейно независимых решения параксиального уравнения со следующими начальными условиями:

$$\nu(z_n) = 0, \quad \nu'(z_n) = 1, \quad g(z_n) = 1, \quad g'(z_n) = 0.$$

Для анализа удобно разбить абберационные интегралы на две части от предмета до центра симметрии и от изображения до центра симметрии.

Для конфокальной системы из одинаковых линз стандартная траектория ν симметрична, а стандартная траектория g — антисимметрична (рис. 3). Распределение осевой компоненты магнитной индукции и ее производной, как мы видели, также антисимметрично. При этом, как можно видеть, при соблюдении принципа конфокальности второй интеграл совпадает с первым для любой из рассматриваемых аббераций. Таким образом, суммарные интегралы аббераций и, следовательно, сами абберации будут равны нулю.

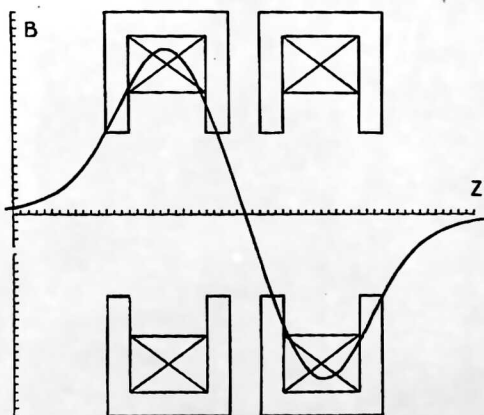


Рис. 3. Ход стандартных траекторий в конфокальной системе

Такая система используется, например, в установках электронной литографии с изменяемой формой прямоугольного пучка в качестве так называемого генератора формы пучка. В этом случае в переднюю фокальную плоскость ($z_{\text{п}}$) и заднюю фокальную плоскость ($z_{\text{н}}$) помещаются квадратные диафрагмы, а в центре симметрии — двухкоординатная отклоняющая система. При освещении параллельным пучком электронов изображение первой диафрагмы переносится на вторую, и с помощью отклоняющей системы можно получить прямоугольный пучок с любым соотношением сторон, который потом уменьшается и перемещается (позиционирует) по образцу.

Преимуществом использования симметричной конфокальной системы в качестве генератора формы пучка является еще и то, что расположение отклоняющей системы в центре симметрии, где пучок имеет минимальные размеры, минимизирует aberrации отклонения.

Требования к точности изготовления диафрагм (особенно к чистоте изображающих кромок) очень высоки, поэтому сами диафрагмы делают достаточно большими. Понятно, что чем больше будет диафрагма и последующее уменьшение, тем меньше будет неровность края пучка на образце.

Можно, конечно, сделать ЭОС с диаметрами каналов линз, намного большими, чем диафрагмы, и снизить искажения изображения, вызванные полевыми aberrациями. Однако при разработке промышленных установок электронной литографии возникает требование уменьшения размеров электронно-оптической колонны, вызванное не только стоимостью изготовления колонны, но в основном очень высокой стоимостью создания чистых помещений, в которых устанавливается это оборудование. Поэтому при относительно большом размере квадратных диафрагм и возникает требование к генератору формы пучка минимальных полевых aberrаций, особенно дисторсии, которая, как известно, пропорциональна третьей степени величины предмета.

Другой вопрос, возникающий при конструировании генератора формы пучка, — это длина системы. Ясно, что как по соображениям механической устойчивости к вибрациям, так и для уменьшения осевых aberrаций длина системы должна быть минимальной, а возбуждение линз — высоким.

Увеличение диаметра канала в линзе и уменьшение расстояния между линзами усиливает влияние суперпозиции полей линз. Для количественной оценки этого явления было проведено численное моделирование конфокальных систем различных конфигураций.

Найти оптимальное положение элементов можно или симметрично, смещая линзы, или, что проще, изменяя положение предмета и, соответственно, изображение. При этом можно контролировать по параксиальным траекториям соблюдение условий конфокальности и симметричности или минимизировать сами коэффициенты aberrаций. И тот, и другой способ, как показали расчеты, приводит к одинаковым результатам. Главное то, что необходимо рассчитывать систему целиком, с учетом наложения полей.

На рис. 4 в качестве примера показаны результаты поиска оптимального положения квадратных диафрагм в генераторе формы из двух одинаковых линз с отношением диаметра канала к зазору, равным 2, и расстоянием между линзами, равным двум зазорам. По оси абсцисс в относительных единицах показано смещение диафрагм от положения, рассчитанного без учета наложения полей, а по оси ординат — приведенные коэффициенты aberrаций: изотропная и анизотропная дисторсия и кома. Видно, что aberrационные коэффициенты превращаются в ноль в одной точке, достаточно далекой от фокальной плоскости одиночной линзы.

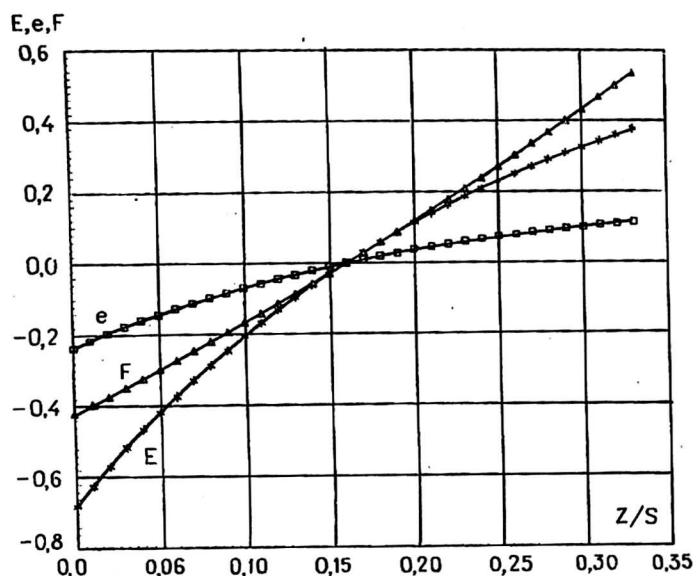


Рис. 4. Абберационные коэффициенты для симметричной системы линз

Рассмотрим более общий случай конфокальной системы (см. рис. 1), когда оптическая сила линз разная. Как говорилось, в этом случае система работает с уменьшением, равным отношению фокусных расстояний первой и второй линз.

Были попытки реализации такой системы в проекционных литографических установках в виде двух геометрически подобных магнитных линз со встречным (равным по модулю) направлением токов возбуждения (рис. 5, а).

Анализ аббераций такой системы показывает, что при строгом соблюдении принципов конфокальности и подобия минимизируются изотропная и анизотропная дисторсия. Кома системы не может отсутствовать, так как интегралы до и после центра подобия отличаются в коэффициент подобия раз.

Однако при практической реализации такой системы не удается избавиться от дисторсии. Это происходит из-за того, что при наложении полей линз происходит нарушение подобия поля системы до и после центра подобия (см. рис. 5, а). Практически для магнитных линз невозможно получить строго подобные поля, так как тогда в центре подобия возникает особая точка (разрыв производной магнитного поля).

Получить идеально подобное распределение поля невозможно, но можно попытаться приблизиться к нему. Для этого авторами предложена (см. рис. 5, б) конструкция двухззорной магнитной линзы с центральным полюсным наконечником в сечении в виде конуса, сходящегося к центру подобия системы. В идеале конус должен достигать оси системы, однако необходимо оставить отверстие для прохода пучка электронов. Но и в этом случае, как можно убедиться (см. рис. 5, б) распределение магнитной индукции довольно близко к идеальному.

На рис. 6 показана зависимость коэффициента изотропной и анизотропной дисторсии от положения предмета (или изображения) для системы, состоящей из двух подобных линз 1 и для системы с конусом 2. В обоих случаях коэффициент подобия равен 5, а расстояние от центра линзы до центра подобия — величине зазора.

Как видно, искажений изображения, пропорциональных корню суммы квадратов коэффициентов, во второй системе намного меньше, чем в первой. Например, при размере маски 50 x 50 мм, при зазоре первой линзы 50 мм искажения на краю изображения в первом случае будут не менее 8 мкм, а во втором — около 1 мкм (рис. 7).

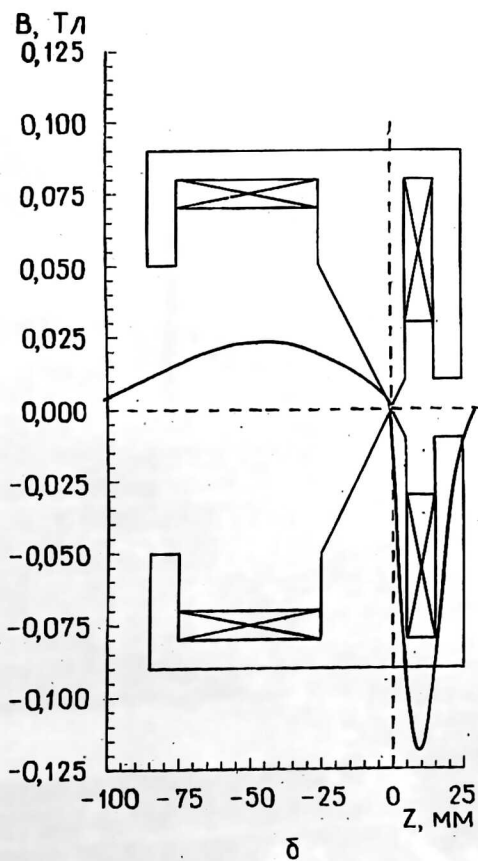
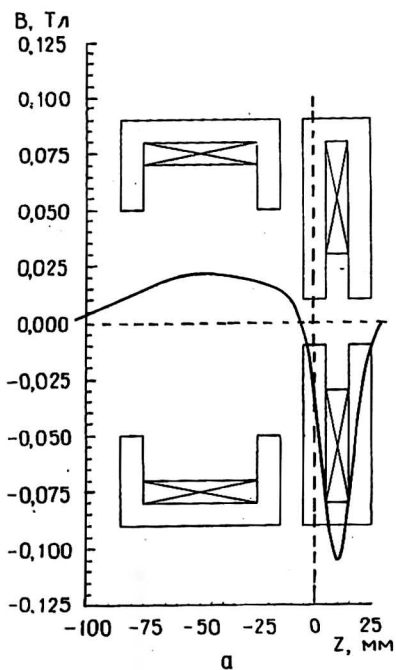


Рис. 5. Распределение осевой компоненты магнитной индукции в системе подобных линз: а — с цилиндрическим магнитопроводом; б — с коническим магнитопроводом

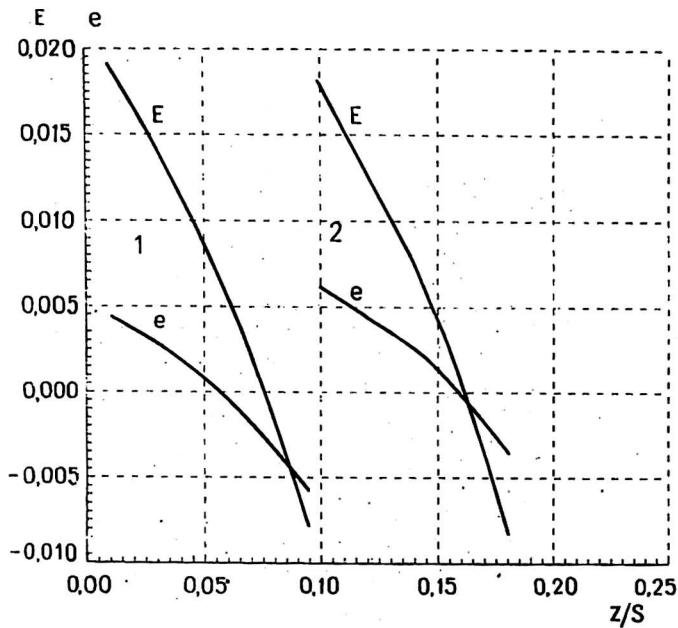


Рис. 6. Коэффициенты изотропной и анизотропной дисторсии системы линз с различными магнитопроводами: 1 — цилиндрический, 2 — конический

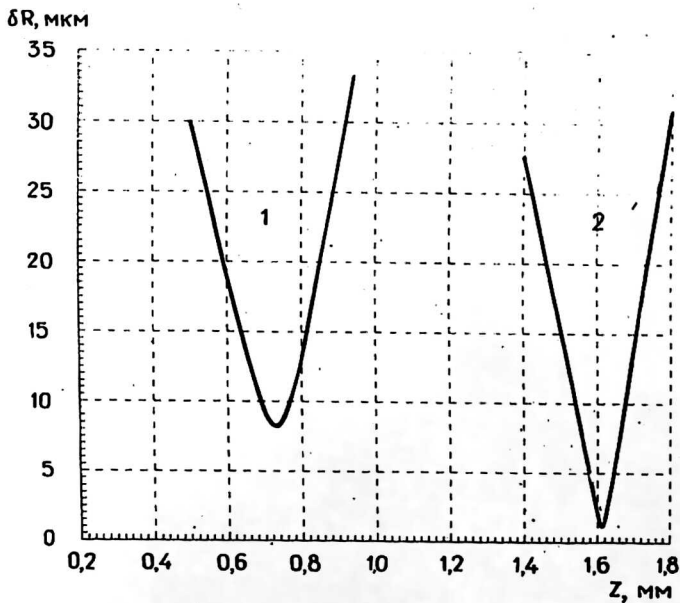


Рис. 7. Оценка искажений на краю изображения: 1 — цилиндрический магнитопровод, 2 — конический магнитопровод

Литература

1. Дер-Шварц Г. В., Макарова И. С. Полевые aberrации третьего порядка осесимметричных магнитных линз // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1972. Т. 36. № 6. С. 1304—1311.
2. Heritage M. B. Electron-projection microfabrication system // J. Vac. Sci. Technol., 1975. V. 12. № 6. P. 1135—1140.

ELECTRON — BEAM CONFOCAL SYSTEMS

B. N. Vasichev, E. P. Mikhaltsov

Moscow State Institute for Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

L. B. Rosenfeld

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

Conditions of field aberrations decreasing in confocal systems, derivated by magnetic lenses are considered. Conditions of decreasing in symmetrical systems of aberrations of an isotropic and anisotropic distortion and coma to zero, and in systems, derivated dy similar lenses, condition of minimization of influence of indicated aberrations are shown. A quantitative evaluation of relation of aberrations from superposition of lenses fields is spent.