

УДК 681.7

Расчет электростатических зеркал, свободных от сферической и осевой хроматической аберраций

С. Б. Бимурзаев, Г. С. Серикбаева, Е. М. Якушев
Казахский государственный национальный университет им. аль-Фараби,
г. Алматы, Республика Казахстан

Выведены расчетные формулы для коэффициентов сферической и осевой хроматической аберраций электростатического электронного зеркала вращательной симметрии. Приведена методика исключения из подынтегральных выражений высоких порядков производных от осевого распределения потенциала в зеркальных системах. Путем численных расчетов определены условия одновременного устранения сферической и осевой хроматической аберраций в трех- и четырехэлектродных электростатических зеркалах, состоящих из соосных цилиндров равного диаметра. Дана принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа с темнопольным изображением, объективом которого является электростатическое электронное зеркало.

Разрешение просвечивающего электронного микроскопа ограничивается сферической и осевой хроматической аберрациями его объектива — электронной линзы [1]. Так как указанные аберрации осесимметричных электронных линз принципиально неустранимы, ведутся поиски различного типа корректоров аберраций электронных линз, в частности, на основе применения электростатических электронных зеркал [2, 3]. Однако использование такого рода корректоров существенно усложняет электронно-оптическую схему объектива, которая помимо объективной линзы должна включать в себя не только электростатическое зеркало, но также магнитную систему разведения падающего и отраженного лучей.

Использование электростатических зеркал в качестве корректоров, как описано в [2, 3], связано, с одной стороны, с утвердившимся мнением о том, что знаки коэффициентов сферической и осевой хроматической аберраций электронных зеркал противоположны знакам коэффициентов соответствующих аберраций для электронных линз, а, с другой стороны — с необходимостью применения корректировки к увеличенному изображению [4] из-за малости шкалы электронного зеркала [5]. Однако, как показано в [6, 7], в электронных зеркалах могут быть обращены в нуль коэффициенты сферической или осевой хроматической аберрации.

Настоящая работа посвящена исследованию класса осесимметричных электростатических зеркал, свободных от сферической и осевой хроматической аберраций одновременно. Обсуждается также возможность использования таких зеркал в качестве объектива просвечивающего электронного микроскопа вместо электронной линзы.

Расчетные формулы для коэффициентов сферической и осевой хроматической аберраций

В цилиндрической системе координат r, ψ, z , ось z которой совпадает с оптической осью зеркала, коэффициенты сферической аберрации третьего порядка C_s и осевой хроматической аберрации второго порядка C_c , приве-

денные к предметной плоскости $z = z_0$, совмещенной с фокальной плоскостью $z = z_f$ зеркала, могут быть записаны в виде [8]:

$$C_s = J_1 + J_2 + J_3 + \alpha,$$

$$C_c = J_4 + J_5,$$

где

$$J_1 = \frac{1}{(4p'_0)^4 \sqrt{\Phi_0}} \int_{z_u}^z \frac{1}{\sqrt{\Phi}} \left\{ \frac{p^3}{2} \left[\frac{\Phi'' - \Phi''_u - \Phi''_u(z - z_u)}{\Phi^2} \right] \left[\frac{3}{2} \Phi'^2 p - \Phi(4\Phi'p' + \Phi''p) \right] + \right. \\ \left. + \frac{p^4 - 1}{2\Phi} \Phi''_u \Phi' + 32pp''(\Phi p'^2 + \frac{1}{4} \Phi''p^2) \right\} dz,$$

$$J_2 = \frac{1}{(16p'_0 g'_0)^2 \sqrt{\Phi_0}} \int_{z_u}^z \left\{ \frac{1}{\sqrt{\Phi}} \left(\frac{\Phi''_u - \Phi''}{\Phi} \right) \left(\Phi'_u + \frac{5}{2} \Phi'pq \right) \Phi'pq + \right. \\ \left. + \left(\frac{\Phi'' - \Phi''_u}{\sqrt{\Phi}} + \frac{\Phi''_u}{\sqrt{\Phi_0}} \right) \left[2pq \left(\Phi'_u + \frac{5}{2} \Phi'pq \right) \right]' + \right. \\ \left. + 64g \left[2p'' \left(\sqrt{\Phi} p'g' + \frac{1}{4} \Phi''pq \right) + q'' \left(\Phi p'^2 + \frac{1}{4} \Phi''p^2 \right) \right] \right\} dz,$$

$$J_3 = \frac{1}{(4g'_0)^4 \sqrt{\Phi_0}} \int_{z_u}^z \left[\frac{7}{2} (\Phi'' - \Phi''_u) (q^4 \Phi' \sqrt{\Phi}) + 32\sqrt{\Phi} q q'' \left(\Phi g'^2 + \frac{1}{4} \Phi''g^2 \right) \right] dz,$$

$$J_4 = -\frac{\sqrt{\Phi_0}}{2p_0'^2} \int_{z_u}^z \frac{pp''}{\sqrt{\Phi}} dz,$$

$$J_5 = -\frac{\sqrt{\Phi_0}}{2g_0'^2} \int_{z_u}^z \sqrt{\Phi} q q'' dz,$$

$$\alpha = \left(\frac{3}{2} + \frac{7\Phi''_u}{16p'_0 g'_0 \sqrt{\Phi_0}} \right) \frac{\Phi'_u}{16p'_0 g'_0 \sqrt{\Phi_0}} - \frac{\Phi''_u}{(4p'_0)^4 \Phi_0}.$$

Здесь $\Phi = \Phi(z)$ — осевое распределение электростатического потенциала, $p = p(z)$ и $g = g(z)$ — линейно независимые частные решения уравнения

$$\Phi r'' + \frac{\Phi' r'}{2} + \frac{\Phi'' r}{4} = 0,$$

причем p — аналитическая функция, $g = q\sqrt{\Phi}$, где $q = q(z)$ — также аналитическая функция, удовлетворяющая уравнению

$$\Phi q'' + \frac{3}{2} \Phi' q' + \frac{3}{4} \Phi'' q = 0.$$

Штрихи обозначают дифференцирование по z , индексом "0" отмечены значения величин в плоскости объекта $z = z_0$, а индексом "u" — в точке поворота зеркала $z = z_u$.

Приведенные формулы для коэффициента сферической аберрации отличаются от формул работы [8] тем, что исключены производные $\Phi'''(z)$ и

$\Phi^{(n)}(z)$ от осевого распределения потенциала. Следует отметить, что процедура исключения производных высших порядков в зеркальных системах хотя и осуществляется, как обычно, методом интегрирования по частям, однако из-за наличия особой точки $z = z_u$, где $\Phi_u = 0$, $\Phi'_u \neq 0$, несколько отличается от аналогичных процедур, применяемых при расчетах электронных линз. По-видимому, по этой причине, а не по причине того, что независимой переменной является время, авторам работы [3] не удалось понизить порядки производных в конечных формулах. В зеркальных системах подынтегральные функции, пропорциональные $\Phi^{(n)}(z)$, должны быть преобразованы следующим образом:

$$F(z)\Phi^{(n)}(z) \rightarrow F'(z)\left(\Phi^{(n-1)}(z) - \Phi^{(n-1)}_u\right).$$

Результаты расчета

Рассчитаны трех- и четырехэлектродные электростатические зеркала, электродами которых служат соосные цилиндры равного диаметра (рис. 1).

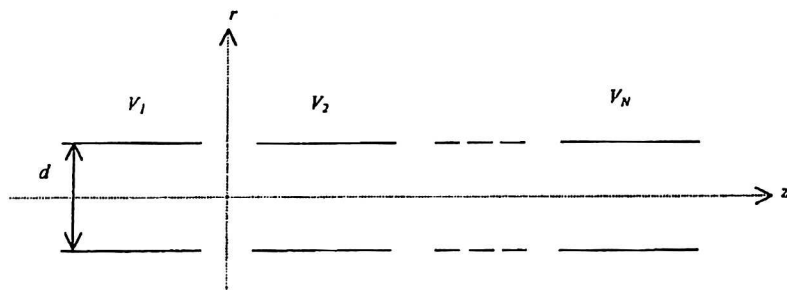


Рис. 1. Осесимметричная система, состоящая из соосных цилиндров равного диаметра

Осевое распределение электростатического потенциала для такой системы, состоящей из N электродов, имеет вид

$$\Phi(z) = \frac{1}{2} \left[(V_1 + V_N) + \sum_{i=1}^{N-1} (V_{i+1} - V_i) U(z - z_i) \right].$$

Здесь V_1, V_2, \dots, V_N — потенциалы на первом, втором, ..., N -м электродах; z_i — координата середины i -го зазора между электродами, а $U(z - z_i)$ определяется по формуле [9]

$$U(z) = \text{sign}(z) \left[1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\exp(-2\alpha_k |z|/d)}{\prod_{m=1}^{\infty} \left(1 - \frac{\alpha_k^2}{\alpha_m^2} \right)_{k \neq m}} \right],$$

где α_k, α_m — корни функции Бесселя нулевого порядка; d — диаметр цилиндра.

Трехэлектродное осесимметричное зеркало. Расчет зеркала проводился следующим образом. Для заданных значений длины среднего электрода L находилось соотношение потенциалов на электродах системы, обеспечивающее условие одновременного устранения сферической и осевой хроматической aberrаций. Из всего многообразия случаев устранения этих aberrаций выделены случаи, когда предметная плоскость, совмещенная с фокальной плос-

костью зеркала, находится перед первым зазором зеркала. Соотношения геометрических и электрических параметров и кардинальные элементы ($z = z_f$ и $z = z_b$ — положения фокуса и вершины зеркала), соответствующие этим случаям, приведены на рисунках 2, а и 3, а.

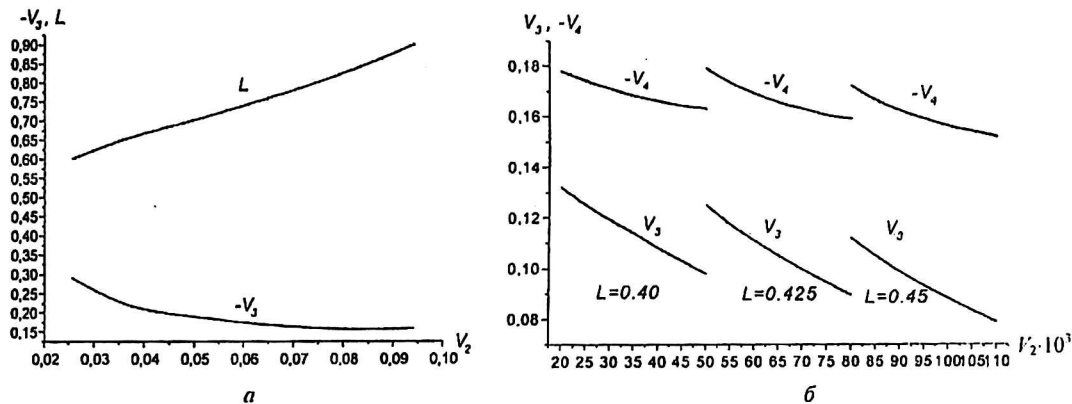


Рис. 2. Соотношения геометрических и электрических параметров свободного от сферической и осевой хроматической aberrаций осесимметричного зеркала: а — трехэлектродного; б — четырехэлектродного

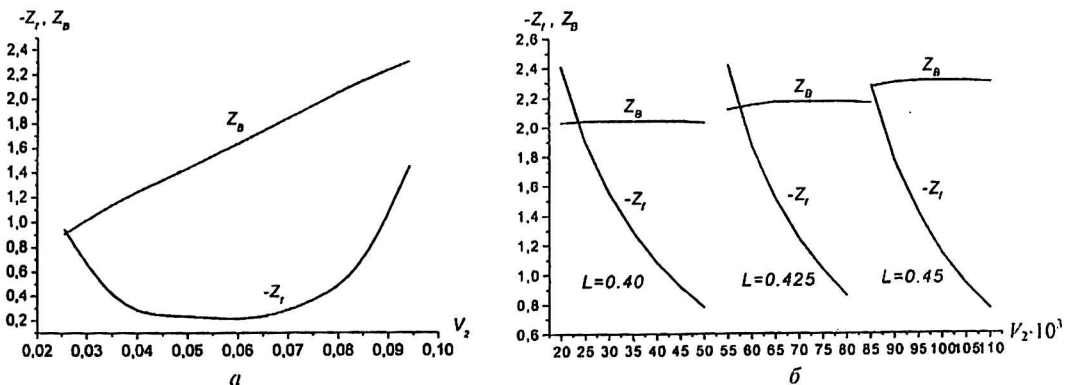


Рис. 3. Кардинальные элементы свободного от сферической и осевой хроматической aberrаций осесимметричного зеркала: а — трехэлектродного; б — четырехэлектродного

Здесь и далее значения геометрических величин даны в единицах d , а значения электрических — в единицах потенциала первого электрода V_1 . Принято, что положительное направление оси z совпадает с направлением падающего пучка, а начало координат находится в середине первого зазора.

Четырехэлектродное осесимметричное зеркало. Как видно из рис. 3, а в трехэлектродном зеркале условия одновременного устранения сферической и осевой хроматической aberrаций выполняются, когда его фокальная плоскость (за исключением крайних значений L) находится в поле зеркала. В случае использования зеркала в качестве объектива электронного микроскопа [10] необходимо, чтобы фокальная плоскость зеркала находилась в свободном от поля пространстве. Это дополнительное условие ограничивает возможность использования рассчитанного трехэлектродного зеркала для целей электронной микроскопии. В целях устранения этого недостатка трехэлектродной системы нами рассчитана четырехэлектродная система, средние электроды которой имеют одинаковую длину. Результаты расчета представлены на рис. 2, б и 3, б.

Как следует из приведенных данных, четырехэлектродные системы имеют более широкие возможности для их использования в электронном микроскопе.

Заключение

Полученные результаты позволяют надеяться на значительное повышение разрешения электронного микроскопа путем использования в качестве его объектива вместо электронной линзы электронного зеркала, свободного от сферической и осевой хроматической аберраций.

Размытие изображения в этом случае связано со сферической аберрацией пятого порядка. Для оценки величины этой аберрации мы провели выборочные расчеты электронных зеркал, свободных от сферической аберрации третьего порядка [6], используя точные уравнения. Так, для трехэлектродной системы $L = 0,4$, $V_2 = -0,07$, $V_3 = -0,319$ радиус кружка наименьшего сечения в предметной плоскости объектива составляет $0,3 \text{ \AA}$ при апертурном угле $0,6^\circ$.

На рис. 4 показана электронно-оптическая схема просвечивающего электронного микроскопа для темнопольного изображения с зеркальным объективом [10]. При этом оптическая ось зеркала совпадает с главной осью электронного микроскопа и объектная плоскость расположена вблизи фокальной плоскости зеркала. Электронный микроскоп работает следующим образом. Сформированный осветительной системой 1 электронный луч 2 падает на расположенный на столике объектов 3 исследуемый объект под некоторым

Оптическая ось

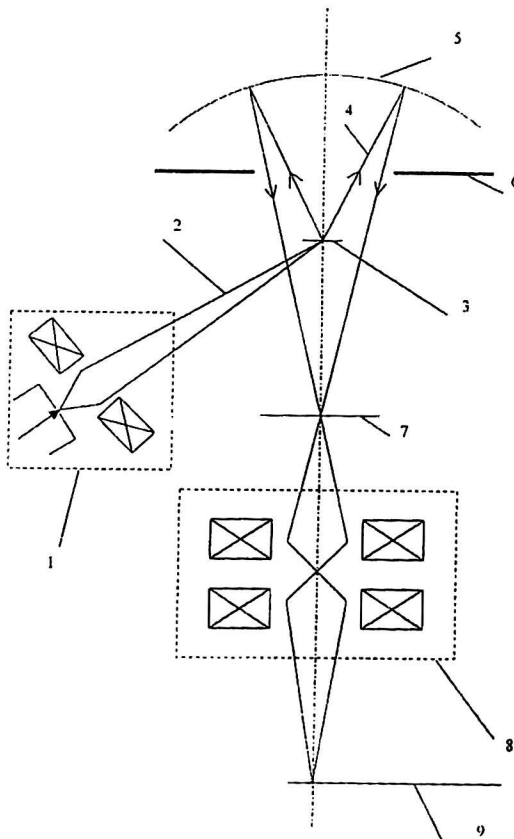


Рис. 4. Схема электронного микроскопа с зеркальным объективом

углом к главной оптической оси микроскопа. При соответствующем выборе указанного угла через отверстие апертурной диафрагмы 6 пройдут только те электроны, которые вследствие взаимодействия с объектом отклонились от

своего первоначального пути. Остальная же часть электронов, не испытавших взаимодействие с объектом, окажется задержанной этой диафрагмой. Отклоненные от первоначального пути электроны 4, отразившись от электростатического электронного зеркала — объектива 5, создадут увеличенное скорректированное от аберраций изображение объекта на промежуточном экране 7. Далее устройства наблюдения и регистрации изображения 8 создадут увеличенное изображение этого промежуточного изображения в плоскости экрана 9.

Л и т е р а т у р а

1. Hawkes P. W. and Kasper E. Principles of Electron Optics (Academic, New York). 1989.
2. Rempfer G. F. //J. Appl. Phys. 1990. № 67(10). P. 6027.
3. Preikszas D. and Rose H. //J. Electron microscopy. 1997. № 46(1). P. 1.
4. Henkelman R. M. and Ottensmayer F. P. //J. Phys. E7, 1974. P. 176.
5. Ramberg E. G. //J. Appl. Phys. 1949. № 20. P.183.
6. Бимурзаев С. Б., Серикбаева Г. С., Хизирова М. А.: Тез. докл. 2-й Межд. конф. "Ядерная и радиационная физика", 1999. С. 154.
7. Бимурзаев С. Б., Дауменов Т. Д., Сарсенова А. //Там же. С. 150.
8. Yakushev E. M. and Sekunova L. M. //Adv. Electron. Electron Phys. 1986. № 68. P. 337.
9. Бобыкин Б. В., Невинный Ю. А., Якушев Е. М. //ЖТФ. 1975. № 45(11). С. 2368.
10. Пат. 2000/0259.1 Электронный микроскоп. Республики Казахстан, 2000.

Calculation of electrostatic mirrors, free from spherical and axial chromatic aberrations

S. B. Bimurzaev, G. S. Serikbaeva, E. M. Yakushev

The All-Faraby's Kazakh State National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

The design formulas for coefficients of spherical and axial chromatic aberrations of an electrostatic electronic mirror of a rotational symmetry are deduced. The procedure of elimination from integrands of the high orders of derivatives from an axial potential distribution in reflecting systems is reduced. By numerical calculations the requirements of simultaneous elimination of spherical and axial chromatic aberrations in three and four-electrode electrostatic mirrors consisting of coaxial cylinders of equal diameter are defined. The principal diagram of a translucent electron microscope with the darkfield image, which has a lens as the electrostatic electronic mirror, is given.