

01;10

## **Возможность уменьшения сферической и хроматической aberrаций в плоских комбинированных осесимметричных магнитоэлектростатических линзах**

© В.А. Жуков, Ю.В. Воробьев, М.М. Нестеров

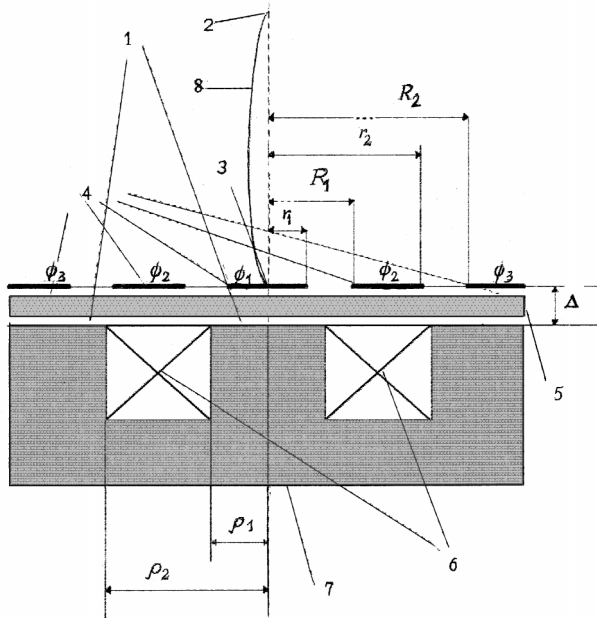
С.-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН  
E-mail: v-zhukov@cards.lanck.net

Поступило в Редакцию 11 мая 2001 г.

В окончательной редакции 17 июля 2001 г.

Продемонстрирована возможность снижения в 6 раз коэффициентов как сферической, так и хроматической aberrаций в плоских комбинированных осесимметричных линзах по сравнению с чисто магнитными линзами при надлежащем выборе соотношения геометрических размеров электродов и полюсных наконечников комбинированной линзы, электрических потенциалов на ее электродах и ампер-витков в катушке возбуждения.

Проблема уменьшения сферической и хроматической осевых aberrаций остается актуальной на протяжении всего пути развития электронной и ионной оптики осесимметричных электронно-оптических систем (ЭОС) [1,2]. Предпринимались с разным успехом многочисленные попытки снижения этих aberrаций, как в чисто электростатических и чисто магнитных ЭОС, так и в комбинированных ЭОС [3–5], с помощью оптимизации пространственного распределения источников поля. Для первых двух категорий ЭОС были даже сформулированы некоторые принципы снижения aberrаций [2]. Для более сложных комбинированных ЭОС таких принципов выведено не было. В работах [3–5] было рассмотрено применение комбинированных осесимметричных линз в низковольтной электронной микроскопии. В этих работах в целях снижения коэффициентов осевых aberrаций использовалось замедление электронов перед объектом, который находился вне поля объективной линзы. В работе [3] коэффициенты осевых aberrаций удалось уменьшить в 1.4 раза. В работах [4,5] уменьшение коэффициентов aberrаций было примерно в 3 раза. В настоящей работе рассматривается плоская



Плоская комбинированная осесимметричная магнитоэлектростатическая линза: 1 — магнитные полюса, 2 — источник электронов, 3 — изображение источника электронов, 4 — электроды, 5 — изолятор, 6 — фокусирующая катушка, 7 — ферромагнетик, 8 — траектория электронов.

комбинированная электромагнитная линза, описанная нами в работе [6] и изображенная на рисунке. В этом случае облучаемый электронами объект, в отличие от работ предшественников [3–5], находится в комбинированном электромагнитном поле плоской объективной линзы, и такое расположение (иммерсия), по аналогии с чисто магнитными линзами [7], позволяет надеяться на дополнительное снижение осевых aberrаций по сравнению с достигнутым в работах [3–5].

Линза в нашем случае состоит из комбинации двух, имеющих общую ось, линз: 1) плоской трехэлектродной электростатической линзы, изготовленной из немагнитного материала, у которой  $r_1$ ,  $r_2$  — внутренние радиусы концентрических кольцевых изолирующих промежутков;  $R_1$ ,  $R_2$  — внешние радиусы;  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  — потенциалы соответствующих электродов. При этом электростатический потенциал на оси ЭОС,

как функция координаты  $z$ , согласно нашей предыдущей работе [6], описывается формулой:

$$\begin{aligned} \Phi_E(z) = & \frac{\phi_2 - \phi_1}{\ln(r_1/R_1)} \cdot \ln \left( \frac{z + \sqrt{z^2 + R_1^2}}{z + \sqrt{z^2 + r_1^2}} \right) \\ & + \frac{\phi_3 - \phi_2}{\ln(r_2/R_2)} \cdot \ln \left( \frac{z + \sqrt{z^2 + R_2^2}}{z + \sqrt{z^2 + r_2^2}} \right) + \phi_3; \end{aligned} \quad (1)$$

2) плоской магнитной линзы, имеющей кольцевой немагнитный зазор с внутренним радиусом, равным  $\rho_1$  и внешним радиусом, равным  $\rho_2$ , у которой магнитное поле  $B_z(0, 0, z)$  на оси  $z$  описывается, согласно нашим предыдущим работам [8,9], формулой:

$$B_z(0, 0, z) = D \cdot \left[ (\rho_1^2 + (z + \Delta)^2)^{-1/2} - (\rho_2^2 + (z + \Delta)^2)^{-1/2} \right], \quad (2)$$

где  $D = \mu_0 \cdot (NI) \cdot [\ln(\rho_1/\rho_2)]^{-1}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Н/м — магнитная постоянная вакуума в системе СИ,  $(NI)$  — ампер-витки в обмотке возбуждения,  $\Delta$  — расстояние между центрами линз (1) и (2) вдоль оси  $z$ .

В фокусирующем поле, представляющем собой сумму полей, описываемых формулами (1) и (2), сначала были рассчитаны параксиальные траектории заряженных частиц. Затем, на основании этих расчетов, с использованием более высоких порядков разложения полей в ряды по степеням координаты, перпендикулярной оси  $z$ , и с применением интегральных формул для коэффициентов аббераций, приведенных в работе [2], были вычислены "при нулевом уменьшении" (т.е. с источником электронов, расположенным на бесконечности) коэффициенты выше упомянутых осевых аббераций, отнесенные к фокусному расстоянию ЭОС. Из результатов расчетов следует, что снижение коэффициентов аббераций наблюдается по крайней мере при двух различных конфигурациях источников полей: 1) при подаче на первый электрод электростатической линзы дополнительного ускоряющего потенциала, на второй электрод — замедляющего, и при заземлении третьего электрода; 2) при противоположном варианте, т.е. при подаче на электроды линзы потенциалов противоположного знака с

одновременным некоторым изменением величины потенциалов и размеров самих электродов. Ширина изолирующих промежутков между электродами была выбрана много меньшей, чем внутренние радиусы соответствующих промежутков (примерно в 10 раз), что позволило считать справедливым приближения, сделанные при выводе аналитической модели поля (формула (1)), а также позволило пренебречь влиянием распределения электрического потенциала на полюсах магнитной части линзы на полупространство выше электродов. Внутренний и внешний радиусы немагнитного зазора выбирались такими, чтобы "полуширина" осевого распределения  $z$ -компоненты магнитного поля была приблизительно равна радиусу внутреннего электрода, а ампервитки в катушке возбуждения выбирались так, чтобы параксиальные траектории в комбинированном поле фокусировались при  $z = 0$ . При этом можно добиться уменьшения коэффициентов как хроматической, так и сферической аберраций в 6 раз по сравнению с чисто магнитной линзой (2), что в 2 раза превосходит результат работы [5] и подтверждает наши первоначальные, почерпнутые из работы [7], предположения о пользе применения иммерсии в объективе. Применение рассмотренного в настоящей работе типа комбинированных линз может оказаться перспективным в ионных и электронных проекционных и микронзондовых системах, особенно для целей микролитографии [10].

## Список литературы

- [1] Scherzer O. // *Optik*. 1947. V. 2. P. 114–132.
- [2] Szilgui M. *Electron and Ion Optics*. New York: Plenum Press, 1988. 639 p.
- [3] Щетнев Ю.Ф. // Труды ГОИ. Ленинград, 1982. Т. 58. В. 192. Кн. 1. С. 42–52.
- [4] Froisen J., Plies E., Auger K. // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1989. V. 7. P. 1874.
- [5] Beck S., Plies E., Schiebel B. // *Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res. A*. 1995. V. 363. P. 31–42.
- [6] Жуков В.А., Завьялова А.В., Воробьев Ю.В., Гелевер В.Д. // Тезисы докладов XVIII РКЭМ. Черногловка, 2000. С. 111.
- [7] Глазер В. *Основы электронной оптики*. М.: ГИТТЛ, 1957. 764 с.
- [8] Жуков В.А., Котликов Е.Н., Гелевер В.Д. // *ЖТФ*. 1999. Т. 69. В. 8. С. 133–134.
- [9] Жуков В.А., Гелевер В.Д., Завьялова А.В., Воробьев Ю.В. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2000. Т. 64. № 8. С. 1584–1588.
- [10] Gross G., Kaesmaier R., Loschner H. et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1998. V. 16. P. 3150–3153.