

УДК 621.385.833.22

## РАСЧЕТ АБЕРРАЦИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ДОПУСКАМИ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКУ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ МАГНИТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛИНЗ

*И. С. Макарова*

Государственное предприятие "НИИ электронной и ионной оптики", Москва, Россия

*Б. Н. Васичев, М. О. Зотова*

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

*А. М. Филачев*

Государственный научный центр "Орион", Москва, Россия

*Приводятся методика и программное обеспечение для расчета аберраций, обусловленных неточностью изготовления и юстировки полюсных наконечников магнитных электронных линз. Оценивается влияние эллиптичности каналов и относительного сдвига осей каналов на коэффициенты аберраций и радиусы кружков рассеяния.*

Попытки определения влияния неточности изготовления или сборки полюсных наконечников магнитных электронных линз на оптические свойства последних проводились очень давно [1—3]. В [4] было показано, что применение гипотезы Бертена [5] для этих целей позволяет производить расчет аберраций, обусловленных допусками на обработку и сборку катодных линз с точностью не хуже 10—15 %. Это возможно, если исключить особую точку на углах полюсного наконечника, где теоретически нормальная производная стремится к бесконечности, и полагая, что точность расчета нормальной производной электроста-

тического потенциала на поверхности каналов составит не более 5 %. Дальнейшее развитие эта методика определения влияния допусков на оптические характеристики магнитных линз получила, например, в работах [6—7].

Реальные электронные линзы не имеют идеальной вращательной симметрии. Это приводит к появлению дополнительных aberrаций, обусловленных этими отклонениями от идеальной симметрии и связанных с допусками на изготовление и сборку магнитных линз. Так, небольшая (в пределах допусков) эллиптичность каналов ПН приводит к возникновению приосевого астигматизма. Несовпадение осей каналов ПН при его сборке (эксцентриситет) приводит к возникновению неосесимметричной поперечной составляющей магнитного поля, вызывающей отклонение пучка и хроматическую aberrацию.

### Вывод формул для расчета aberrаций, возникающих из-за неточности изготовления и сборки ПН магнитных электронных линз

Магнитное поле  $O$ , в области, свободной от токов, может быть рассмотрена с помощью скалярного магнитного потенциала  $\varphi_m$ .

$$B = -\mu_0 \text{grad} \varphi_m.$$

В областях, свободных от токов и зарядов, в силу идентичности основных уравнений электростатики и магнитостатики  $\text{div } B = \text{div } E = 0$  и  $\text{rot } \vec{B} = \text{rot } \vec{E} = 0$ , значения магнитостатического потенциала соответствуют значениям электростатического потенциала. Дифференциальное уравнение для распределения скалярного магнитного потенциала в осесимметричной магнитной линзе удовлетворяет уравнению Лапласа.

При наличии малой деформации границы распределение скалярного потенциала представляется в виде:

$$\varphi_m(r, z, \Theta) = \varphi_m(r, z) + \Delta \varphi_m(r, z, \Theta),$$

где  $\varphi_m(r, z, \Theta)$  — значение скалярного магнитного потенциала в осесимметричной линзе с малыми нарушениями вращательной симметрии.

$\varphi_m(r, z)$  — решение уравнения Лапласа для невозмущенной краевой задачи с граничными условиями первого рода;

$\Delta \varphi_m(r, z, \Theta)$  — возмущение потенциала первого порядка, обусловленное той или иной деформацией.

Введенная функция  $\varphi_m(r, z, \Theta)$  определяется из решения краевой задачи с неосесимметричными возмущениями при помощи гипотезы Бертена [5]. По гипотезе Бертена малая деформация границы аналогична появлению возмущающих потенциалов  $\varphi_r(r, z, \Theta)$  на невозмущенной границе, пропорциональных величине этой деформации  $h$  и нормальной производной скалярного магнитного потенциала к невозмущенной поверхности канала ПН.

$$\varphi_r(r, z, \Theta) = -h \frac{\partial \varphi_m(r, z)}{\partial n}. \quad (1)$$

Тогда решение рассматриваемой краевой задачи можно найти в виде потенциала простого слоя:

$$\Delta \varphi_m(r, z, \Theta) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int \frac{\sigma_m dS}{\rho}, \quad (2)$$

где  $\sigma_m$  — плотность фиктивных магнитных зарядов на невозмущенной границе, обусловленных малой деформацией;

$dS$  — элемент поверхности границы;

$\rho$  — расстояние от точки на поверхности канала с координатами  $R_q, z_q, \Theta$  до точки приосевой области с координатами  $r, z_\alpha, \gamma$  в полярной системе координат;

$\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума.

Функцию  $\sigma_m$  определяем по аналогии с электростатикой  $\sigma_m = B_n$ , где  $B_n$  — нормальная составляющая магнитной индукции на поверхности каналов, т. е.:

$$\sigma_m = -\mu_0 \frac{\partial \varphi_r(r, z, \Theta)}{\partial r}. \quad (3)$$

### Вывод формул для расчета влияния малой эллиптичности каналов полюсных наконечников магнитных линз на электронно-оптические характеристики последних

При малой эллиптичности каналов полюсных наконечников деформация  $h$  имеет вид, представленный на рис. 1.

$$h = \varepsilon_s \cos 2(\Theta + \alpha), \quad (4)$$

где соответственно большая и малая полуоси эллипса равны:

$$a = R(1 + \varepsilon_s) \text{ и } b = R(1 - \varepsilon_s),$$

где  $\varepsilon_s$  — допуск на изготовление каналов — величина максимальной эллиптической деформации каналов.

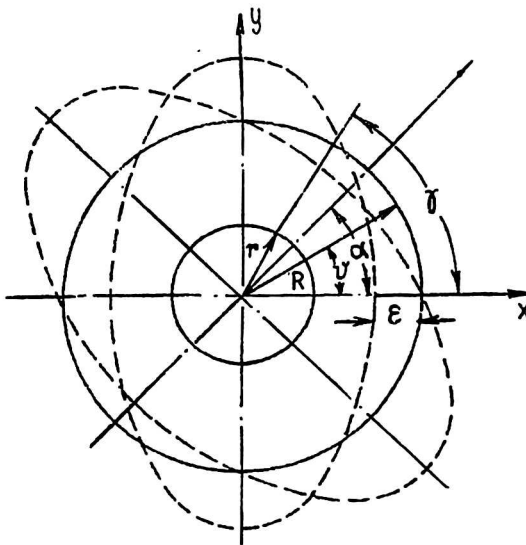


Рис. 1. Деформация, вызванная эллиптичностью каналов полюсных наконечников

Подставляя (1), (2) и (4) в (3), получим:

$$\Delta \varphi_m(r, z, \Theta) = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_{qH}}^{z_{qK}} \frac{\frac{\partial \varphi_m(R_q, r, \Theta)}{\partial r} \cos 2(\Theta + \alpha) R_q d\Theta dz_q}{\sqrt{R_q^2 + (z_q - z_a)^2 + r^2 - 2R_q r \cos(\gamma - \Theta)}}. \quad (5)$$

Здесь  $z_{qн}$  и  $z_{qк}$  — соответственно  $z$  — координаты начала и конца распределения фиктивных магнитных зарядов, обусловленных эллиптической деформацией на недеформированной поверхности канала.

Разлагая (5) в ряд, отбрасывая члены с малыми  $\gamma$  и  $\varepsilon$  в степени выше второй и интегрируя по углу  $\Theta$ , получаем выражение для возмущающего потенциала на электронно-оптической оси, обусловленного эллиптической деформацией каналов.

Введем следующие обозначения:

$$M = \left[ R_q^2 + (z_q - z_a)^2 \right]; \quad f_{\Theta} = \int_{z_{qн}}^{z_{qк}} \frac{\partial \varphi_m(R_q, z)}{\partial r M^{5/2}} dz_q;$$

$$\eta^* = \sqrt{\frac{e}{2m}},$$

где  $e$  и  $m$  — величина заряда и массы электрона, соответственно.

С учетом вышеизложенного, возмущения, вносимые нарушением осевой симметрии (эллиптичностью каналов), записываются в следующем виде:

$$P_1 = \eta^* \frac{3}{16} \frac{R_{qп}^2}{\pi} \varepsilon_{п} f_{\Thetaп} \sin 2\alpha \cos 2\Theta + \frac{3}{16} \eta^* \frac{1}{\pi} \left[ \varepsilon_{\lambda} + f_{\Theta\lambda} R_{q\lambda}^2 + \varepsilon_{п} f_{\Thetaп} R_{qп}^2 \cos 2\alpha \right] \sin 2\Theta;$$

$$P_2 = \eta^* \frac{3}{16} \frac{R_{qп}^2}{\pi} \varepsilon_{п} f_{\Thetaп} \sin 2\alpha \sin 2\Theta - \frac{3}{16} \eta^* \frac{1}{\pi} \left[ \varepsilon_{\lambda} f_{\Theta\lambda} R_{q\lambda}^2 + \varepsilon_{п} f_{\Thetaп} R_{qп}^2 \cos 2\alpha \right] \cos 2\Theta.$$

Здесь индексы "п" и "л" указывают, что константы или функции относятся к правому или левому полюсному наконечнику соответственно.

С учетом этого дифференциальные уравнения траекторий электронов можно представить так:

$$x'' + \frac{e}{8mU^*} B_z^2 x = P_1 x - P_2 y = f_1; \tag{6}$$

$$y'' + \frac{e}{8mU^*} B_z^2 y = -P_1 y - P_2 x = f_2. \tag{7}$$

Решая эти уравнения методом вариации произвольных постоянных, получаем выражения для составляющих радиуса размытости, обусловленного приосевым астигматизмом, вызванным эллиптической деформацией каналов полюсного наконечника. Величину радиуса размытости приосевого астигматизма считаем по формуле:

$$r_{\text{аст}} = \gamma_0 \sqrt{R_1^2 + R_2^2},$$

где  $\gamma_0$  — апертурный угол пучка;

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{U^*}} \int_{z_n}^{z_k} f_1 v^2 dz; \tag{8}$$

$$R_2 = \frac{1}{\sqrt{U^*}} \int_{z_n}^{z_k} f_2 v^2 dz, \tag{9}$$

$v$  — решение однородных дифференциальных уравнений (6) и (7) с начальными условиями в плоскости объекта:  $v(0) = 0$ ,  $v'(0) = 1$ .

### Вывод формул для расчета влияния относительного сдвига каналов полюсных наконечников, обусловленного неточностью юстировки или сборки

Деформация при этом виде возмущения осевой симметрии имеет вид, приведенный на рис. 2

$$h = \varepsilon_c \cos \Theta,$$

где  $\varepsilon_c$  — величина допуска на сборку полюсного наконечника.

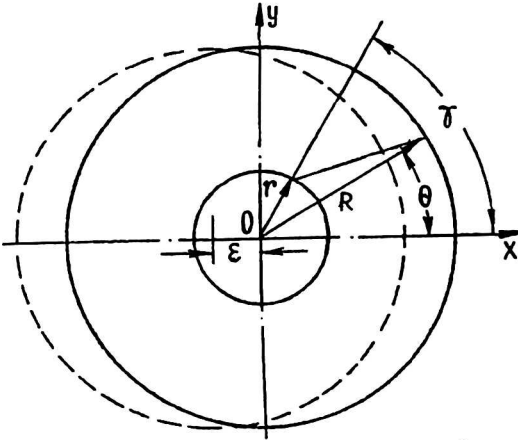


Рис. 2. Деформация, вызванная относительным сдвигом осей каналов полюсных башмаков линзы

Подставляя (1), (3) и (8) в (2), получим:

$$\Delta \varphi_m(r, z, \gamma) = \frac{\varepsilon_c}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_{qк}}^{z_{qн}} \frac{\frac{\partial \varphi_m(R_q, r, \Theta)}{\partial r} \cos(\Theta + \alpha) R_q d\Theta dz_q}{\sqrt{M} \sqrt{1 + (r^2 - 2R_q r \cos(\gamma - \Theta)) / M}}.$$

Разлагая знаменатель в ряд, отбрасывая члены  $r$  и  $\varepsilon$  в степенях выше второй, интегрируя по углу  $\Theta$  и вводя обозначение:

$$f_c = \int_{z_{qк}}^{z_{qн}} \frac{\partial \varphi_m(R_q, z, \Theta)}{\partial r} \frac{1}{M^{3/2}} dz_q,$$

получаем:

$$\varphi_m(r, z, \gamma) = \frac{\varepsilon_c R}{8\pi} f_c r.$$

Уравнения траекторий электронов с учетом вышеизложенного можно записать в следующем виде:

$$x'' + \frac{e}{8mU^*} B_z^2 x = -\eta \frac{\varepsilon_c}{8\pi R^2} f_c \cos \Theta;$$

$$y'' + \frac{e}{8mU^*} B_z^2 y = \eta \frac{\varepsilon_c}{8\pi R^2} f_c \cos \Theta.$$

Решая эти уравнения методом вариации произвольных постоянных и выражая траекторию через апертурный угол  $\gamma_0$  и стандартную траекторию  $u$ , получим выражение для радиуса размытости, обусловленного абберациями относительного сдвига каналов полюсного наконечника.

Отсюда компоненты величины кружка размытости, обусловленного хроматической аберрацией относительного сдвига каналов ПН, имеют вид:

$$\Delta x = \frac{\eta \mu_0 \epsilon_c}{16 \pi R} \gamma_0 \frac{\Delta U}{U} (\ominus \cos \Theta + \sin \Theta) \int_{z_0}^{z_H} f_c u dz,$$

$$\Delta y = \frac{\eta \mu_0 \epsilon_c}{16 \pi R} \gamma_0 \frac{\Delta U}{U} (\ominus \sin \Theta - \cos \Theta) \int_{z_0}^{z_H} f_c u dz.$$

Выражение для радиуса кружка размытости хроматической аберрации от сдвига каналов ПН принимает вид:

$$\Delta r_c = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \frac{\Delta U}{U} \gamma_0 C_{xp},$$

где  $\frac{\Delta U}{U}$  — нестабильность ускоряющего напряжения.

### Расчет допусков на изготовление и сборку магнитных линз и обусловленных ими аберраций

Для проведения расчетов по этим алгоритмам и соответствующим программам необходимо предварительно посчитать распределение скалярного магнитного потенциала на оси и в пограничной области каналов ПН испытываемых электронных линз.

Результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициентов аберраций и обусловленных ими кружков размытости, вызванных эллиптичностью каналов ПН объективных линз электронных микроскопов

| Линза | Допуск на эллиптичность $\epsilon_e$ , мм | $C_{аст}$ , мм       | $\Delta_{аст}$ , мм  | $D_1, D_2$ , мм | $S$ , мм |
|-------|---|----------------------|----------------------|-----------------|----------|
| 1     | $0,5 \cdot 10^{-2}$                       | $0,48 \cdot 10^{-3}$ | $0,24 \cdot 10^{-5}$ | 3, 6            | 5        |
| 2     | $0,5 \cdot 10^{-2}$                       | $0,32 \cdot 10^{-3}$ | $0,16 \cdot 10^{-5}$ | 4, 4            | 6        |
| 3     | $0,5 \cdot 10^{-2}$                       | $0,22 \cdot 10^{-3}$ | $0,11 \cdot 10^{-5}$ | 30, 30          | 30       |

Пр и м е ч а н и е.  $D_1, D_2, S$  — величина диаметров каналов и зазора ПН;  $C_{аст}$  — коэффициент астигматизма, обусловленного эллиптичностью каналов ПН электронных линз;  $\epsilon_e$  — допуск на эллиптичность каналов ПН;  $\Delta_{аст}$  — радиус кружка размытости, обусловленного  $C_{аст}$  при величине  $\epsilon_e = 0,5 \cdot 10^{-2}$  мм, величине угла раскрытия пучка  $\gamma_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  и величине угла рассогласования главных осей эллипсов  $\alpha = 0$  радиан.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициентов аберраций и обусловленных ими кружков размытости, вызванных неточностями сборки полюсных наконечников объективных линз электронных микроскопов

| Линза | Допуск на сдвиг $\epsilon_r$ , мм | $C_{хр}$ , мм        | $\Delta_{хр}$ , мм    |
|-------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1     | $0,5 \cdot 10^{-2}$               | $0,55 \cdot 10^{-4}$ | $0,14 \cdot 10^{-10}$ |
| 2     | $0,5 \cdot 10^{-2}$               | $0,19 \cdot 10^{-4}$ | $0,47 \cdot 10^{-11}$ |
| 3     | $0,5 \cdot 10^{-2}$               | $0,49 \cdot 10^{-4}$ | $0,12 \cdot 10^{-10}$ |

Пр и м е ч а н и е.  $\epsilon_r$  — допуск на юстировку и сборку ПН электронных линз;  $\frac{\Delta U}{U}$  — величина нестабильности ускоряющего напряжения;  $C_{хр}$  — коэффициент хроматической аберрации, обусловленный относительным сдвигом каналов ПН электронной линзы;  $\Delta_{хр}$  — радиус кружка размытости, обусловленный  $C_{хр}$  при  $\epsilon_r = 0,5 \cdot 10^{-2}$  мм,  $\gamma_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  и  $\frac{\Delta U}{U} = 5 \cdot 10^{-5}$ .

Полученные выражения использованы в программе расчета электронно-оптических характеристик магнитных электронных линз, разработанной для IBM PC на языке TURBO BASIC. Программа работает в режиме диалога. Она позволяет в режиме поиска рассчитывать эксплуатационные и оптические параметры первого порядка магнитной линзы, ее центральные aberrации, параметры электронного зонда, формируемого системой, состоящей из одной магнитной линзы для различных положений объекта и значений увеличения системы или положений изображения, и строить графики зависимости тока зонда, плотности тока в зонде, а также величины оптимальной апертуры пучка от величины рабочего отрезка линзы. Программа позволяет рассчитывать величину aberrаций, обусловленных допусками на обработку и сборку полюсных наконечников рассчитываемых магнитных линз с точностью порядка 10—15 %.

Значения распределения магнитного поля на оси линзы, а также нормальной производной к внутренней поверхности каналов полюсных наконечников магнитных линз считаются по программе ELZOND, разработанной Г. В. Лебедевым и Н. А. Тимченко в Ленинградском институте аналитического приборостроения.

#### Литература

1. Sturrock P. A. The aberration of magnetic electron lenses due to asymmetry//Phil. Trans. Royal. Soc. London, 1951. V. 243. № 2. P. 387—429.
2. Archard G. D.//Journ. Sci. Instr., 1953. V. 30, № 10. P. 353—359.
3. Glaser W., Shiske P.//Zeit. Angew. Physic, 1953. Bd. 5, № 9, S. 329—336.
4. Дер-Шварц Г. В., Куликов Ю. В. К теории допусков электронно-оптических приборов// Радиотехника и электроника, 1962. Т. 33. № 12. С. 2067—2071.
5. Bertein F. Relation entre les defauts de realisation des lentilles et la nettete des images // Ann. Radioelectr., 1947. V. 2, № 7. P. 379—408.
6. Дер-Шварц Г. В., Куликов Ю. В. Aberrации третьего порядка катодных линз с нарушенной осевой симметрией//Радиотехника и электроника, 1968. Т. 13. № 12. С. 2223—2227.
7. Монастырский М. А., Колесников С. В. Новый метод расчета возмущений потенциала в задачах со слабо нарушенной осевой симметрией//ЖТФ, 1983. Т. 53. С. 1669—1678.

## APROXIMATE CALCULATION OF ABERRATIONS CAUSED BY TOLERANCES FOR FABRICATION AND ALIGNMENT OF MAGNETIC LENS'S POLE PIECES

*I. S. Makarova*

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

*B. N. Vasichev, M. O. Zotova*

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

*A. M. Filachev*

State Scientific Center "Orion", Moscow, Russia

*The methods and program product for the calculation of magnetic electron lens's aberration, caused by the unpreciston of fabrctatton and allgnment of pole pieces are presented. The influence of channel's elliptcity and the relative shift of channels in pole pieces on aberration coefficients and radiuses of aberration's circle of disperston are estimated.*