

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. А. Жуков, А. Б. Абрамянц, Синтез магнитных объективов растровых электронно-оптических систем,  
*ЖТФ*, 1986, том 56, выпуск 10, 1962–1966

<https://www.mathnet.ru/jtf393>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.85

18 мая 2025 г., 19:05:16



УДК 537.533.3

## СИНТЕЗ МАГНИТНЫХ ОБЪЕКТИВОВ РАСТРОВЫХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. А. Жуков, А. Б. Абрамянц

На основании анализа выражений для коэффициентов аберраций отклонения найдено минимальное значение полной аберрации в фокусирующе-отклоняющем магнитном поле. Предложена схема синтеза магнитных объективов для растровых электронно-оптических систем, реализующая наименьшее значение полной аберрации 3-го порядка, устойчивая к неточностям изготовления и юстировки объектива.

В настоящее время перед разработчиками растровой электронной оптики высокого разрешения встала задача получения изображения, содержащего  $10^5$ — $10^6$  строк. Подобные требования возникают, например, в электронной микроскопии, электронной литографии и техническом телевидении. Разрешающая способность сканирующих электронно-оптических приборов определяется аберрациями совместно действующих объектива и отклоняющей системы [1]. В последние годы было предложено несколько методов синтеза объективов и отклоняющих систем высокого разрешения: метод «движущейся объективной линзы» [2], «качающейся объективной линзы» [3] и метод многоступенчатого отклонения [4, 5]. Последний метод приводит к системам менее устойчивым по отношению к неточности изготовления и юстировки, поэтому ограничимся рассмотрением первых двух, дающих наиболее удовлетворительные результаты при практической реализации. В этих методах общее фокусирующе-отклоняющее поле системы пространственно разделяется на поле предотклонения и поле «движущейся линзы», которые рассматриваются отдельно без учета возможности их перекрывания. При этом ось электронного пучка, прошедшего поле предотклонения, предполагается прямой. Поле «движущейся линзы» состоит из поля фокусировки и поля корректора, который смещает ось линзы так, чтобы она совпала с этой прямой.

Целью данной работы является обобщение методов синтеза магнитных объективов высокого разрешения с учетом возможности перекрывания полей предотклонения и «движущейся линзы».

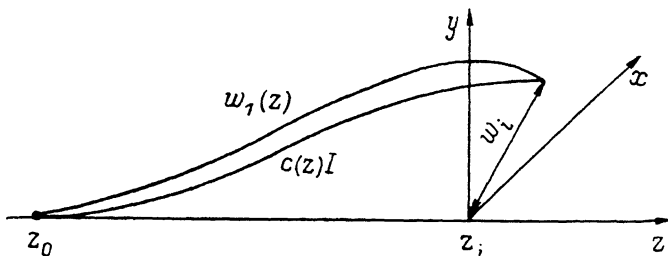
### 1. Постановка задачи

В растровых электронно-оптических системах высокого разрешения предмет для объектива, формирующего зонд на мишени, служит либо промежуточное изображение источника, либо малая диафрагма, заполненная электронами. Поскольку такой предмет имеет малые размеры, то при рассмотрении формирования растрового изображения на мишени можно пренебречь полевыми аберрациями, связанными с конечными размерами предмета, по сравнению с аберрациями отклонения и осевыми аберрациями объектива.

Рассмотрим точечный источник электронов, находящийся в точке  $z_0$  на оси системы (см. рисунок). Параксиальное уравнение траектории электронов в комбинированном фокусирующе-отклоняющем магнитном поле, согласно [6], имеет вид

$$w_1' - ik(Bw_1' + B'w_1/2) = -ikDI, \quad (1)$$

где  $k = \sqrt{e/2mV}$ ;  $e$  и  $m$  — заряд и масса покоя электрона;  $V$  — средняя энергия электронного пучка;  $w_1 = x + iy$  — комплексная координата траектории электрона;  $I = I_x + iI_y$  — комплексный ток в одинаковых  $X$ - и  $Y$ -катушках отклонения;  $B(z) = B_z(0, 0, z)$  — осевое распределение фокусирующего магнитного поля;  $D = D_x + iD_y$  — осевое распределение отклоняющего магнитного поля при  $I = 1$  А;  $D_x = B_x(0, 0, z)$ ;  $D_y = B_y(0, 0, z)$ .



Главная отклоненная траектория  $c(z)$  и произвольная параксиальная отклоненная траектория  $w_1(z)$ .

$z_0$  — положение источника,  $z_i$  — положение плоскости изображения,  $w_i = w_1(z_i)$ .

Для решения уравнения (1) рассмотрим два линейно-независимых решения  $a(z)$  и  $b(z)$  соответствующего однородного уравнения

$$w_1'' - ik(Bw_1' + B'w_1/2) = 0 \quad (2)$$

при  $a(z_0) = 0$ ,  $a'(z_0) = 1$ ,  $b(z_0) = 1$ ,  $b'(z_0) = 0$ .

Решение уравнения (1) имеет вид

$$w_1(z) = a(z)s_0 + c(z)I, \quad (3)$$

где  $s_0$  — начальный комплексный наклон траектории электронов,

$$c(z) = -ika(z) \int_{z_0}^{z_i} D(\xi)b(\xi)d\xi + ikb(z) \int_{z_0}^{z_i} D(\xi)a(\xi)d\xi \quad (4)$$

— траектория электронов с нулевым начальным наклоном к оси при единичном отклоняющем токе;  $z_i$  — положение плоскости изображения.

Ограничимся рассмотрением аберраций: геометрических — третьего и хроматических — первого порядка. Тогда полная аберрация выражается через сумму членов

$$\begin{aligned} \Delta w_i &= K_D w_i^2 \bar{w}_i && \text{— дисторсия,} \\ &+ K_F w_i \bar{w}_i s_i && \text{— кривизна поля,} \\ &+ K_A w_i^2 s_i && \text{— астигматизм,} \\ &+ K_L w_i s_i \bar{s}_i && \text{— продольная кома,} \\ &+ K_R \bar{w}_i s_i^2 && \text{— поперечная кома,} \\ &+ K_S s_i^2 \bar{s}_i && \text{— сферическая аберрация,} \\ &+ K_{TV} w_i \frac{\Delta V}{V} && \text{— поперечная и продольная хро-} \\ &+ K_{XV} s_i \frac{\Delta V}{V} && \text{— матические аберрации, обуслов-} \\ & && \text{— ленные разбросом в энергиях} \\ & && \text{— электронов соответственно,} \\ &+ K_{TI} w_i \frac{\Delta NI}{NI} && \text{— поперечная и продольная хро-} \\ &+ K_{XI} s_i \frac{\Delta NI}{NI} && \text{— матические аберрации, обуслов-} \\ & && \text{— ленные колебанием тока в фо-} \\ & && \text{—кусирующей линзе соответственно,} \end{aligned}$$

где  $s_i = s_0 a'(z_i)$  — комплексный наклон траектории электронов в плоскости изображения;  $w_i = c(z_i)I$  — величина отклонения;  $\Delta V/V$  — величина относительного разброса в энергиях электронов;  $\Delta I/I$  — величина относительного колебания тока в линзе.

Коэффициенты aberrаций выражаются известным образом [6] через функции  $a, c, D, B$ . Аберрации кривизны поля и астигматизма корректируются известными методами при помощи динамических стигматора и подфокусировки. Дисторсию отклонения корректируют, подавая в отклоняющую систему дополнительный сигнал, кубичный по току отклонения. Сферическая и продольная хроматическая aberrации определяются только полем фокусировки.

Сформулируем теперь требования, которым должен удовлетворять объектив, действующий совместно с отклоняющей системой.

1. Заданное распределение фокусирующего поля  $B$ , которое выбирается из конструктивных требований и минимальности сферической и продольной хроматической aberrаций.

2. Минимальность aberrаций отклонения, линейных по величине отклонения.

Заметим, что коэффициенты aberrаций должны удовлетворять определенным соотношениям [2, 6], следующим непосредственно из принципа наименьшего действия

$$\text{Im}(K_s) = \text{Im}(K_F) = 0, \quad (5)$$

$$K_L = 2\bar{K}_R. \quad (6)$$

Известно также [6] соотношение между коэффициентами продольной хроматической aberrации

$$2K_{XV} + K_{XI} = 0. \quad (7)$$

На основе анализа формул для коэффициентов нами получено соотношение, связывающее коэффициенты поперечной хроматической aberrации

$$2K_{TV} + K_{TI} = -1. \quad (8)$$

Из соотношения (6) следует, что обе комы обращаются в нуль одновременно, а из (8) — что невозможно обратить в нуль полную поперечную хроматическую aberrацию.

3. Ортогональность падения электронного пучка на мишень. Это требование вытекает из необходимости исключить дополнительную aberrацию, связанную с наклонным падением электронного пучка на неровную поверхность мишени.

## 2. Система с криволинейно изменяющейся осью

Развивая идеи работ [2, 3] о системах с «движущейся линзой», предположим, что и в случае пространственного совмещения полей предотклонения и «движущейся линзы» aberrации отклонения будут минимальны, если электронный пучок распространяется по оси «движущейся линзы». Однако в нашем случае ось уже не будет прямой линией. Ось следует назвать такую траекторию электронов, которая не изменяется при выключении поля «движущейся линзы». В этом случае уже пропадает смысл термина «предотклонение», и вместо него мы всюду в дальнейшем будем употреблять обычный термин «отклонение».

Сформулируем теперь математическое условие совпадения оси электронного пучка с криволинейно изменяющейся осью линзы. Пусть полное поле отклонения имеет вид

$$D(z) = D^k(z) + D^0(z), \quad (9)$$

где  $D^k(z)$  — осевое распределение поля корректора линзы,  $D^0(z)$  — осевое распределение отклоняющего поля.

Тогда при включенном поле «движущейся линзы» уравнение для главной отклоненной траектории

$$c'' - ik(Bc' + B'c/2) = -ik(D^0 + D^k), \quad (10)$$

а при выключенном

$$c'' = -ikD^0. \quad (11)$$

Поэтому для совпадения оси «движущейся линзы» с осью электронного пучка необходимо следующее поле корректора:

$$D^k = Bc' + B'c/2. \quad (12)$$

Не ограничивая общности рассмотрения, можно положить  $L_{(z)}^0 = iD_y(z)$ . Тогда  $L^k(z) = D_x(z)$ ,  $I = I_x$ ,  $c = \bar{c}$ , параксиальное уравнение для главной траектории

$$c'' = kD_y(z). \quad (13)$$

Выражения для коэффициентов интересующих нас аберраций принимают вид

$$K_L = \frac{1}{[\bar{a}'\bar{a}'a'c]_{z_i}} \int_{z_0}^{z_i} F_1(z) D_y(z) dz, \quad (14)$$

$$K_{TV} = \frac{1}{2[\bar{a}'c]_{z_i}} \int_{z_0}^{z_i} F_2(z) D_y(z) dz, \quad (15)$$

где

$$F_1 = \bar{a}a'\bar{a}' - \frac{1}{2}a\bar{a}'^2 + i\frac{k}{2}\bar{a}^2(aB' + a'B), \quad F_2 = \bar{a}.$$

При минимизации поперечной хроматической аберрации можно учесть, что обычно в электронно-оптических системах высокого разрешения с большой плотностью тока на мишени ( $10^2$  а/см<sup>2</sup>) вследствие эффекта Берша

$$\Delta V/V \gg \Delta NI/NI. \quad (16)$$

Поэтому минимум будет практически достигаться при  $K_{TV} = 0$ . Условие ортогональности падения электронного пучка на мишень, как следует из уравнения (13), можно записать в виде

$$\int_{z_0}^{z_i} F_3(z) D_y(z) dz = 0, \quad (17)$$

где  $F_3(z) \equiv 1$ .

Таким образом, математически все требования к объективу сводятся к выполнению условия (12) и трем условиям ортогональности для функции  $D_y(z)$  на отрезке  $[z_0, z_i]$

$$\int_{z_0}^{z_i} F_n(z) D_y(z) dz = 0, \quad n = 1, 2, 3. \quad (18)$$

Выполнимость условий (18) бесконечным числом способов очевидна. Например, можно выбрать  $D_y$  в виде

$$D_y(z) = \sum_{m=1}^6 \alpha_m f_m(z),$$

где  $f_m(z)$  — произвольные независимые функции;  $\alpha_m$  — коэффициенты, которые определяются из решения линейной системы

$$\sum_{m=1}^6 \alpha_m A_{m,n} = 0, \quad n = 1, 2, 3,$$

где

$$A_{m,n} = \int_{s_0}^{z_i} f_m(z) F_n(z) dz.$$

Полная абберация такого объектива

$$\Delta w_i = K_S s_i^2 \bar{s}_i + K_{XV} s_i \frac{\Delta V}{V} + K_{XI} s_i \frac{\Delta NI}{NI} - w_i \frac{\Delta NI}{NI}.$$

При заданном магнитном поле фокусировки меньшего значения полной абберации достигнуть невозможно. Если условие (16) не выполняется, то второе условие в (18) можно записать так:

$$\int_{s_0}^{z_i} F_2(z) D_y(z) dz = - \frac{2(\Delta NI/NI)^2}{(\Delta V/V)^2 + 4(\Delta NI/NI)^2},$$

что обеспечивает наименьшее значение поперечной хроматической абберации. Это уточнение практически ничего не меняет в вышеприведенных рассуждениях относительно возможности построения функции  $D_y$ .

### Выводы

Схема синтеза объективов с криволинейно изменяющейся осью получается следующей.

1. Из конструктивных требований и минимальности коэффициентов сферической  $K_S$  и продольной хроматической абберации  $K_X$  выбирается фокусирующее поле  $B$ .

2. Решением параксиального однородного уравнения (2) определяется фундаментальная траектория  $a(z)$  и вычисляются функции  $F_n(z)$ .

3. Из условий ортогональности (18) выбирается отклоняющее поле  $D_y(z)$ .

4. Решением уравнения (13) определяется главная отклоненная траектория  $c(z)$  и вычисляется поле корректора  $D_x(z)$  по формуле (10).

Следует отметить, что предложенная схема синтеза в силу линейности условий, связывающих поля отклонения и фокусировки, устойчива к малым изменениям этих полей.

Произвол, имеющийся на третьем этапе, можно устранить, накладывая какие-либо дополнительные требования, например требование максимальной эффективности отклонения при конструктивных ограничениях или минимальности аббераций более высоких порядков.

### Литература

- [1] Глазер В. Основы электронной оптики. М.: ГИТЛЛ, 1957. 763 с.
- [2] Goto E., Soma T. Optik, 1977, v. 48, N 3, p. 255—270.
- [3] Zhong-wei Chen, Pei-young Qiu, Jian-kun Wang. Optik, 1983, v. 64, N 4, p. 341—347.
- [4] Hosokawa T., Takeuchi Y., Ohshiba H. Optik, 1981, v. 58, N 4, p. 241—250.
- [5] Lencová B. Optik, 1981, v. 58, N 1, p. 25—36.
- [6] Munro E. Optik, 1974, v. 39, N 4, p. 450—466.

Поступило в Редакцию  
22 июля 1985 г.