

УДК 681

## Некоторые проблемы проектирования электронной оптики ЭОП с быстрой разверткой изображения

А. Б. Забавин, Ю. В. Куликов, И. Г. Прянишников  
Научно-исследовательский институт импульсной техники, Москва, Россия

*Рассмотрены некоторые проблемы проектирования электронной оптики ЭОП с быстрой разверткой изображения. Представлены результаты сравнения электронно-оптических характеристик конкретных конструктивно-эквивалентных электростатических и магнитных линз, которые могут быть применены для фокусировки изображения в этих ЭОП. Показано, что в случае узкоформатных ЭОП электронно-оптические характеристики магнитных линз имеют незначительное преимущество по сравнению с электростатическими. В случае широкоформатных ЭОП это преимущество является весьма существенным.*

Анализ имеющихся публикаций, посвященных созданию ЭОП с быстрой разверткой изображения и высоким временным разрешением, обнаруживает тенденцию применения для фокусировки изображения в этих приборах магнитных линз [1—5]. Представляется весьма актуальным выяснить, насколько эта тенденция действительно обусловлена электронно-оптическими свойствами магнитных линз, а не связана чисто техническими проблемами. Экспериментальное изучение этого вопроса является весьма затруднительным и сопряжено с рядом побочных эффектов, маскирующих искомый результат. Этим, в частности, можно объяснить отсутствие в известных публикациях ясного количественного обоснования преимуществ использования магнитной фокусировки изображения. Использование компьютерного моделирования проще и позволяет решить проблему в чистом виде. Ниже приводится описание результатов сопоставления электронно-оптических характеристик рассматриваемого типа линз на конкретном примере. Исследование проводилось с помощью компьютерного моделирования в приближении теории аббераций до третьего порядка включительно. Теория аббераций и ее практическое применение в задачах компьютерного проектирования электронно-оптических систем достаточно подробно изложены в ряде публикаций и по этой причине здесь не рассматриваются [6]. Расчеты проводились с помощью специализированного пакета прикладных программ ELIM-E [7]. Траектории заряженных частиц и время пролета в этом пакете представляются в виде известных абберационных разложений по степеням выбранной системы малых параметров не выше третьей и включающих геометрические, хроматические и временные абберации [6]. Конкретный вид этих рядов в неподвижной системе декартовых координат  $x, y, z$  приводится ниже.

$$r = e^{i\psi} \{ [\varepsilon_p^{1/2} e^{i\alpha_0} v + r_0 e^{i\beta_0} (w - i(e/8m)^{1/2} B_0)] + \varepsilon_p^{1/2} \varepsilon_z^{1/2} e^{i\alpha_0} (H + ih) + \\ + r_0 \varepsilon_z^{1/2} e^{i\alpha_0} (K + ik) + \varepsilon_p^{1/2} \varepsilon_z^{1/2} e^{i\alpha_0} (P + ip) + \varepsilon_p^{1/2} \varepsilon_z^{1/2} (Q + iq) + \\ + \varepsilon_p^{3/2} e^{i\alpha_0} (B + ib) + \varepsilon_p r_0 [(G + ig) e^{i\beta_0} + (F + if) e^{i(2\alpha_0 - \beta_0)}] + \\ + \varepsilon_p^{1/2} r_0^2 [(D + id) e^{i\alpha_0} + (C + ic) e^{i(2\beta_0 - \alpha_0)}] + r_0^3 e^{i\beta_0} (E + ie) \},$$

где  $r = x + iy$ ,  $e/m$  — отношение абсолютной величины заряда электрона к его массе;

$\alpha_0$  — угол между проекцией начальной скорости фотоэлектрона на плоскость фотокатода и осью  $ox$ ;

$\beta_0$  — угол между радиус-вектором начальной точки и осью  $ox$ ;

$B_0$  — значение осевой составляющей магнитного поля в центре фотокатода;

$\varepsilon_p^{1/2}$ ,  $\varepsilon_z^{1/2}$  — радиальная и осевая компоненты начальной скорости, выраженные в единицах потенциала ( $\varepsilon$  — начальная энергия);

$v$ ,  $w$  — предельные независимые решения параксиального уравнения (при  $\varepsilon_p^{1/2} \rightarrow 0$ ,  $\varepsilon_z^{1/2} \rightarrow 0$ ), во вращающейся системе координат

$$u'' + u\Phi'/2\Phi + u(\Phi'' + eB^2/2m)/4\Phi = 0.$$

Начальные условия для предельных решений в плоскости фотокатода ( $z = z_0$ ) имеют вид:

$$v = 0, w = 1, v' = 1/\varepsilon_z^{1/2}, w' = 0.$$

Вращающаяся система координат связана с неподвижной соотношением

$$u = r e^{i\Psi},$$

где  $\Psi$  — угол поворота вращающейся системы координат относительно неподвижной, причем

$$\Psi = (e/8m)^{1/2} \int_{Z_0}^{Z_S} B\Phi^{-1/2} dz,$$

$H, h, \dots, E, e$  — коэффициенты аберраций до третьего порядка включительно;  $\Phi, B$  — осевые распределения электростатического потенциала и магнитной индукции, соответственно; штрихи означают дифференцирование по  $z$ ;

$Z_0$  —  $z$ -координата центра фотокатода;

$Z_S$  — координата центра экрана.

Аберрационный ряд для времени пролета имеет вид

$$t = T + \varepsilon_z^{1/2} t_2 + \varepsilon_p t_{11}/2 + \varepsilon_z t_{22}/2 + \varepsilon_p^{1/2} \varepsilon_z^{1/2} t_{12}/2 + \varepsilon_p^{1/2} r_0 t_{13}/2 + r_0^2 t_{33}/2,$$

где  $t_2, \dots, t_{33}$  — коэффициенты временных аберраций;  $T$  — время пролета заряженной частицы с нулевой начальной скоростью вдоль оси до заданной плоскости.

Коэффициенты аберраций получены с помощью метода  $\tau$ -вариаций [6]. Они имеют достаточно громоздкий вид и в данной работе не приводятся. Отметим, что искомое сравнение типов фокусировки представляется корректным лишь при исследовании линз, эквивалентных по своей конструкции и режиму питания. В качестве образца магнитной линзы была взята бронированная магнитная линза, аналогичная используемой в ЭОП фирмы *Naipamatsu* [1]. Конструкция этого ЭОП схематически представлена на рис. 1.

Она состоит из плоского входного окна, на которое нанесен сурьмяно-цезиевый фотокатод. Энергетическое распределение фотоэлектронов этого фотокатода близко к параболическому с наиболее вероятной энергией, равной 0,34 эВ. На расстоянии 1,6 мм от фотокатода расположена плоская мелкоструктурная сетка с шагом 10 мкм и толщиной прутка 2 мкм. Фотокатод

представляет собой эмитирующую полосу шириной 0,05 мм и длиной 0,23 мм. Между фотокатодом и сеткой приложено полное ускоряющее напряжение в 10 кВ. Между сеткой и экраном располагается эквипотенциальное пространство. Фокусировка изображения на люминесцентном экране в ЭОП фирмы Hamamatsu производится бронированной магнитной линзой. В качестве электростатического аналога этой линзы рассматривалась одиночная электростатическая линза со средним электродом, играющим роль фокусирующего электрода. Для обеспечения конструктивной эквивалентности длина фокусирующего электрода принималась равной ширине немагнитного зазора магнитной линзы  $S$ , а диаметры среднего и крайних электродов полагались одинаковыми и равными внутреннему диаметру канала в полюсном наконечнике магнитной линзы  $D$  (рис. 2). Ширина и длина излучающей полоски фотокатода в случае электростатической линзы брались такие же, как для магнитной.

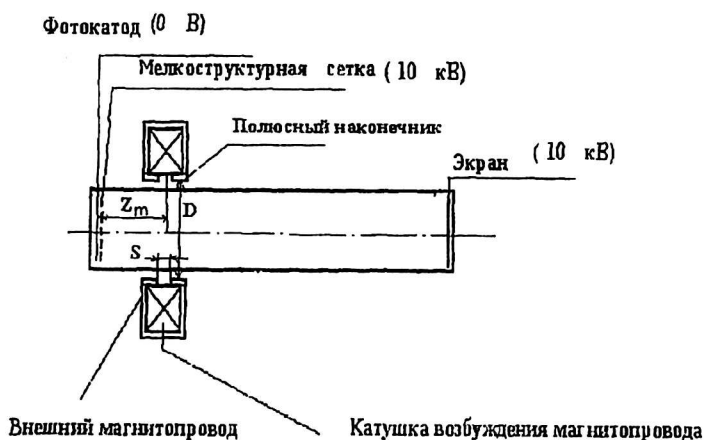


Рис. 1. Схема электронно-оптической системы ЭОП фирмы Hamamatsu с магнитной фокусировкой

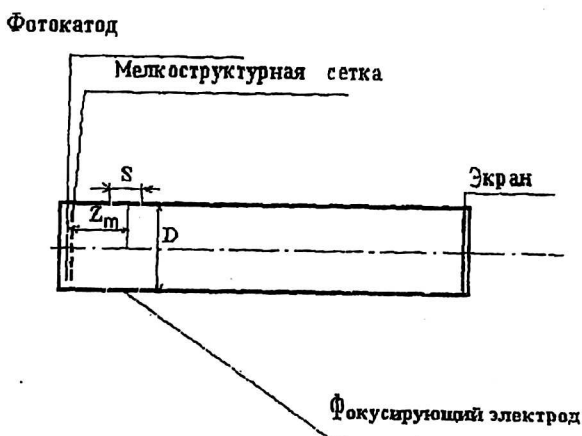


Рис. 2. Аналог электронно-оптической системы ЭОП фирмы Hamamatsu с электростатической фокусировкой

Расстояние от фотокатода до средней плоскости немагнитного зазора в ЭОП с магнитной фокусировкой и расстояние от фотокатода до средней плоскости фокусирующего электрода одиночной линзы  $Z_m$  полагались равными. В ЭОП с электростатической фокусировкой использовались те же фо-

токатод, сетка, экран и те же потенциалы на них, что и в показанном на рис. 1, ЭОП — с магнитной фокусировкой. Фокусирующий электрод изолировался от крайних электродов с помощью небольших зазоров. Скорости развертки изображения  $V_s$  в обоих случаях принимались одинаковыми, а режимы питания магнитной и электростатической линз подбирались эквивалентными. Это означает, что магнитодвижущая сила катушки возбуждения магнитной линзы  $IN$  и потенциал фокусирующего электрода электростатической линзы  $U_f$  должны обеспечивать одинаковую оптическую длину  $L_s$  обоих ЭОП. В данном случае  $L_s$  — расстояние от фотокатода до плоскости наилучшей фокусировки центра фотокатода, в этой же плоскости размещался люминесцентный экран. Основные конструктивные размеры, режимы питания и скорость развертки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип фокусировки	$L_s$ , мм	$D$ , мм	$S$ , мм	$Z_m$ , мм	$IN$ , А·В	$U_f$ , В	$V_s$ , мм/с
Магнитная	268	29	40	66	750	—	$1,6 \cdot 10^{11}$
Электростатическая	268	29	40	66	—	-1220	$1,6 \cdot 10^{11}$

Для сравнения определялись параметры первого порядка, в том числе увеличение  $M_0$ , расстояние от фотокатода до кроссовера  $Z_c$ , угол поворота изображения  $\Delta\beta$ , время пролета электронов с нулевой начальной энергией вдоль оптической оси от фотокатода до экрана  $T$  (табл. 2).

Таблица 2

Тип фокусировки	$M_0$	$Z_c$ , мм	$\Delta\beta$ , град	$T$ , нс
Магнитная	2,92	115	258	4,54
Электростатическая	2,95	110	180	5,54

Как видно из данных табл. 2, параметры первого порядка ЭОП с магнитной и электростатической фокусировкой чрезвычайно близки, а так как разница в угле поворота никак не сказывается на качестве изображения, то никакого преимущества магнитной фокусировки здесь не обнаруживается, за исключением времени пролета. Действительно, время пролета при магнитной фокусировке примерно на 20 % меньше, чем при электростатической. Поскольку в промежутке между фотокатодом и сеткой ускоряющие электрические поля идентичны, можно утверждать, что увеличение времени пролета при электростатической фокусировке по сравнению с магнитной происходит в промежутке между сеткой и экраном и определяется свойствами электростатической линзы. В отличие от магнитной линзы, в пределах которой электроны двигаются с постоянной и максимальной скоростью, в случае электростатической фокусировки между сеткой и средней плоскостью фокусирующего электрода существует область торможения. Это видно из представленного на рис. 3 расчетного осевого распределения потенциала электростатической линзы  $\Phi(z)$ .

Эта область всегда присутствует при подаче на фокусирующий электрод более низкого по сравнению с ускоряющим напряжением потенциала, что необходимо для обеспечения фокусировки изображения в заданной плоскости. На рис. 3 представлены расчетные значения осевого распределения второй производной потенциала по  $z$  в электростатической линзе  $\Phi''(z)$ , а также два стандартных решения (траектории) параксиального уравнения с одинаковыми начальными условиями на фотокатодом как для магнитной линзы  $v(z, B)$ , так и для электростатической линзы  $v(z, \Phi)$ . Из рис. 3 видно, что стандартные траектории существенно отличаются друг от друга. Это связано с

тем, что область отрицательных значений второй производной потенциала действует на электроны как рассеивающая линза. У магнитной линзы такого свойства нет, она всегда собирающая. Поэтому в электростатической линзе траектория за счет рассеивающего промежутка дальше отклоняется от оси, чем в магнитной, а значит, в меньшей степени удовлетворяет условию параксиальности. Аналогичный эффект возникает и для второй пары независимых решений, а это может привести к увеличению aberrаций. Расчеты показывают, что это действительно так.

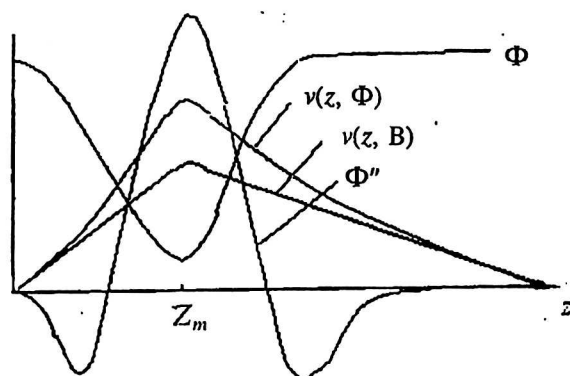


Рис. 3. Иллюстрация к решению параксиального уравнения (все величины даны в условных единицах)

В табл. 3 приведены значения некоторых коэффициентов aberrаций в плоскости изображения (сферическая —  $B$ , кривизна —  $D$ , дисторсия —  $E$ , хроматическая временная aberrация —  $t_{22}$ , временная aberrация положения —  $t_{33}$ ) как для ЭОП с магнитной фокусировкой, так и с электростатической. Значения коэффициентов сферохроматических aberrаций второго порядка  $H$  и временных хроматических aberrаций  $t_2$ , вносящих основную составляющую в пространственное и временное разрешение в центре рабочего поля фотокатода, соответственно, в обоих случаях одинаковы и по этой причине в табл. 3 не приведены. Дело в том, что эти aberrации не зависят от типа фокусировки, а зависят только от напряженности электрического поля в центре фотокатода, т. е. от отношения приложенного к сетке напряжения к расстоянию между сеткой и фотокатодом.

Таблица 3

Тип фокусировки	$B, \text{ мВ}^{-3/2}$	$D, \text{ мм}^{-1} \cdot \text{В}^{-1/2}$	$E, \text{ мм}^{-2}$	$t_{22}, \text{ сВ}^{-1}$	$t_{33}, \text{ см} \cdot \text{м}^{-2}$
Магнитная	$-6,7 \cdot 10^{-4}$	$-1,4 \cdot 10^{-2}$	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	$-2,2 \cdot 10^{-12}$	$7,2 \cdot 10^{-13}$
Электростатическая	$-3,4 \cdot 10^{-3}$	$-1,3 \cdot 10^{-3}$	$-9,9 \cdot 10^{-3}$	$-5,3 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$

Приведенные в табл. 3 результаты указывают на то, что существенное различие между магнитной и электростатической линзой возникает в коэффициентах aberrаций более высокого порядка, причем в пользу магнитной.

Окончательное суждение о преимуществе магнитной фокусировки можно сделать после сравнения характеристик качества изображения. Результаты расчета характеристик качества изображения приведены в табл. 4. Результаты даны для двух режимов работы ЭОП — в узкоформатном ( $l < 1 \text{ мм}$ ) и широкоформатном ( $l > 1 \text{ мм}$ ). Здесь  $l$  — длина эмитирующей полоски фотокатода.

Предложенное деление является весьма условным, однако оно дает возможность выделить тот режим, в котором преимущество магнитной фокусировки является наиболее очевидным. Далее удобнее ввести понятие радиуса рабочего поля фотокатода  $r_0$ , положив  $l = 2r_0$ . Для определенности в узкоформатном режиме размер рабочего поля был взят таким же, как и в упомянутом выше ЭОП фирмы Hamamatsu [2, 3], в широкоформатном режиме — взят почти в 20 раз большим.

Таблица 4

Тип фокусировки	Формат	$r_0$ , мм	$N_0$ , штр/мм	$Nr_0$ , штр/мм	$\Delta\tau_0$ , пс	$\Delta\tau_{r_0}$ , пс
Магнитная	Узкий	0,115	180	180	0,36	0,36
Электростатическая	"	0,115	180	180	0,46	0,53
Магнитная	Широкий	2,0	180	140	0,36	0,9
Электростатическая	"	2,0	180	40	0,46	3,6

В табл. 4  $N_0$  — пространственное разрешение в центре;  $Nr_0$  — пространственное разрешение на краю;  $\Delta\tau_0$  — временное разрешение в центре фотокатода;  $\Delta\tau_{r_0}$  — временное разрешение на краю рабочего поля. Пространственное и временное разрешение вычислялись на уровне 5 % контраста в изображении пространственной и, соответственно, временной синусоидальной миры с учетом энергетического и углового распределений фотоэлектронов, ширины эмитирующей площадки фотокатода, рассеивающего действия мелкоструктурной сетки, скорости развертки и частотно-контрастной характеристики экрана. Как видно из табл. 4, в узкоформатном режиме при магнитной фокусировке, как и при электростатической, пространственное разрешение в центре и на краю рабочего поля фотокатода одинаковы. Временное разрешение, как в центре, так и на краю выше при магнитной фокусировке. Наличие в электростатической линзе области торможения, как отмечалось выше, приводящее к увеличению времени пролета, снижает временное разрешение. В широкоформатном режиме пространственное и временное разрешения на краю рабочего поля фотокатода при электростатической фокусировке примерно в 4 раза ниже, чем при магнитной.

Таким образом, в результате проведенного компьютерного исследования удалось получить количественное подтверждение преимущества магнитной фокусировки по сравнению с электростатической в ЭОП с быстрой разверткой изображения, особенно в широкоформатном режиме.

### Л и т е р а т у р а

1. Kinoshita K., Ito M., Suyama M.//SPIE, High Speed Photography, Videography and Photonics VI. 1988. V. 981. P. 62.
2. Inagaki Y., Takeshita T., Kinoshita K.//Will be presented in 24<sup>th</sup> ICHSPP, 2000.
3. Kinoshita K., Suyama M., Inagaki Y., Ishihara Y., Ito M.//SPIE, 19<sup>th</sup> International Congress on High-Speed Photography and Photonics. 1990. V. 1358. P. 490.
4. Kinoshita K., Ito M., Suyama M.//SPIE, High Speed Photography and Photonics. 1988. V. 1032. P. 441.
5. Feldman G. G., Ilyna T. A., Korjenevitch I. N., Syrzev V. N.//SPIE, 19<sup>th</sup> International Congress on High-Speed Photography and Photonics. 1990. V. 1358. P. 497.
6. И'ин В. П., Катешов В. А., Куликов Ю. В., Монастырский М. А.//Emission-Imaging Electron-Optical System Design.- Adv. in Electronics and Electron Physics, 1990.
7. Куликов Ю. В.//Прикладная физика. 1996. № 3. С. 66.

## **Some problems of designing the electron optics of the electron-optical image converter with fast-speed picture scanning**

*A. B. Zabavin, Yu. V. Kulikov, I. G. Pryanishnikov*  
Research Institute of Pulse Technique, Moscow, Russia

*Some problems of designing the electron optics of the electron-optical image converter with fast-speed picture scanning are considered. Comparison results of electron-optical characteristics of particular structurally equivalent electrostatic and magnetic lenses are presented. They can be used to focus the picture in these electron-optical image converters. It is shown that for the case of narrow-format electron-optical image converters the electron-optical characteristics of magnetic lenses have a negligible advantage as compared to electrostatic ones. For the case of wide-format electron-optical image converters, this advantage is very substantial.*