

УДК 621.385.833.22

Моделирование и анализ аберраций, возникающих вследствие нарушения геометрии быстродействующих магнитных стигматоров и квадрупольных линз

Л. Б. Розенфельд

Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики, Москва, Россия

Б. Н. Васичев, М. О. Зотова

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

Приведены методика расчета и анализ результатов по влиянию неточности изготовления на электронно-оптические характеристики квадрупольных линз и стигматоров. Оценены величина размытия пучка и величина ошибки позиционирования при сдвиге, наклоне и изменении длины и радиуса отдельных проводников электронно-оптических элементов.

Быстродействующие магнитные квадрупольные линзы и стигматоры, используемые в системах динамической фокусировки и коррекции электронного пучка для обеспечения малой индуктивности, обычно изготавливаются с малым числом витков. Стигматоры, размещаемые непосредственно в канале полюсного наконечника объективной линзы, также содержат малое число витков. При малом числе витков отклонение геометрии даже одного витка от заданной может существенно повлиять на конфигурацию формируемого магнитного поля и, следовательно, на электронно-оптические характеристики стигматоров и квадрупольных линз.

Для оценки влияния неточности изготовления указанных электронно-оптических элементов на их параметры в численном эксперименте при различных начальных условиях по методикам, описанным в работах [1, 2] и основанным на формулах в [3, 4], рассчитывались отклонения траекторий электронов, проходящих в деформируемом элементе, от траекторий электронов, проходящих через недеформированный элемент. В результате расчетов получены величины ошибок позиционирования и размытия пучка. Рассматривалось влияние дефектов изготовления, вызванных смещением и перекосом одного или нескольких концов проводников по координатам R , Z и φ . Оценивались также характеристики электронно-оптических элементов (ЭОЭ) при случайных вариациях дефектов всех угловых точек рамок с током.

Для сопоставимости результатов различных численных экспериментов использовалась модель круглого пучка, состоящего из траекторий, параллельных оси симметрии ЭОЭ. Радиус этого пучка при проводимых нами количественных оценках выбирался равным 10 % от радиуса стигматора. Для достижения приемлемой точности количественной оценки влияния различных дефектов рассчитывались от 50 до 150 траекторий, равномерно распределенных по азимутальному углу θ и по радиусу. Это позволило получить количественную оценку влияния того или иного дефекта на пучок.

Использование при расчете модели цилиндрического пучка дало возможность количественно описать влияние различных видов деформаций ЭОЭ на их параметры.

В реальных электронно-оптических системах через стигматор и квадрупольную линзу проходят чаще сходящиеся (а иногда расходящиеся) пучки электронов (рис. 1, а, б). Очевидно, что влияние дефектов ЭОЭ в этом случае зависит не только от их характеристик, но и от того, какую апертуру имеет отклоняемый пучок, каков его радиус в пределах ЭОЭ и на каком расстоянии от ЭОЭ находится плоскость фокусировки пучка. Оценка влияния деформаций для случая сходящегося пучка проводилась при одном рабочем отрезке $L = 200$ мм (что соответствует рабочему отрезку технологического электронно-лучевого оборудования).

Для цилиндрического и конического пучков оценивались следующие параметры:

отклонение угла наклона реальной траектории от идеальной ($\Delta\alpha$);

абсолютная величина смещения реальной траектории в плоскости наблюдения от идеальной (ΔR).

Обычно воздействие ЭОЭ характеризует изменение угла наклона траекторий в пучке (см. рис. 1, а, б). В деформированном стигматоре и квадрупольной линзе изменение углов наклона отличается от изменения углов в недеформированном ЭОЭ. Для количественной оценки этого наклона вычислялись разность углов наклона в плоскостях x и y ($\Delta\alpha_x, \Delta\alpha_y$) для деформированного и недеформированного ЭОЭ, а также полная ошибка отклонения по углу $\Delta\alpha$.

$$\Delta\alpha = \sqrt{\Delta\alpha_x^2 + \Delta\alpha_y^2},$$

где $\Delta\alpha_x = \alpha_{xd} - \alpha_{xi}$; $\Delta\alpha_y = \alpha_{yd} - \alpha_{yi}$,

а индексы i и d соответствуют траекториям в идеальной и реальной (дефектной) системе координат.

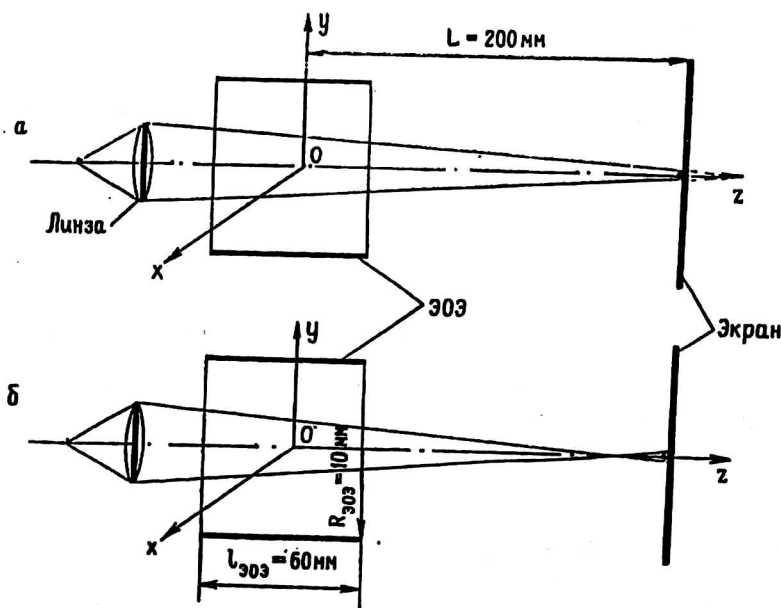


Рис. 1. Ход лучей в электронно-оптическом элементе: а — в плоскости ХОZ; б — в плоскости УОZ

Кроме того, проводился расчет линейного смещения траекторий электронов в возмущенном ЭОЭ на расстоянии $L = 200$ мм, а также разность координат реальной и идеальной траекторий в указанной плоскости, абсолютная величина Δx , Δy в заданной плоскости и абсолютная величина отклонения ΔR .

$$\Delta R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2},$$

где $\Delta x = x_d - x_i$; $\Delta y = y_d - y_i$.

В качестве примера рассмотрим результаты расчета влияния допусков изготовления на два варианта конструкции ЭОЭ, изображенных на рис. 2, а, б с различным выполнением торцевых проводников и с одинаковой протяженностью проводников вдоль оси пучка. Для ЭОЭ расстояние концов отрезка от оси Z принималось равным $R = 10$ мм, угол $\varphi = 45^\circ$, протяженность вдоль оси $Z = 60$ мм, допуск на изготовление ЭОЭ составлял величину $d = 0,1$ мм.

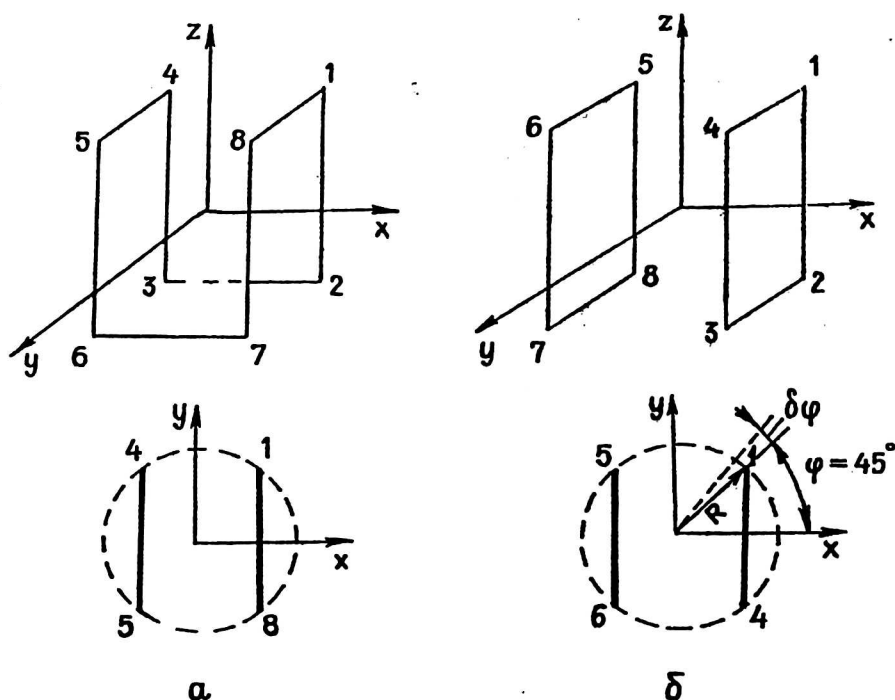


Рис. 2. Схема расположения проводников в электронно-оптическом элементе

Рассчитывались траектории для идеальной геометрии проводников и для случаев, учитывающих влияние следующих ошибок изготовления при различном возбуждении ЭОЭ:

1. Изменение положения точки 1 в направлении R на величину d (перекос по R).
2. Изменение положения точек 1 и 5 в направлении R на величину d в разные стороны (перекос по R).
3. Изменение положения точки 1 или точек 1 и 5 по дуге угла φ на угол $\delta\varphi = d/R$ (перекос по φ).
4. Изменение положения точки 1 или точек 1 и 5 в направлении Z на величину d в разные стороны (перекос по Z).

5. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении по R на величину d (смещение по R).

6. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по R на величину d (смещение по R).

7. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении по φ на величину $\delta\varphi$ (смещение по φ).

8. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по φ на величину $\delta\varphi$ (смещение по φ).

9. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении по Z на величину d (смещение по Z).

10. Смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по Z на величину d (смещение по Z).

Идеальный ЭОЭ сориентирован так, что отклонение происходит в направлении оси y . Для деформированного ЭОЭ оценивались смещения пучка в плоскостях x и y за счет возмущения магнитного поля. Оценивалась также абсолютная величина смещения ΔR .

Были получены семейства зависимостей изменения угла отклонения $\Delta\alpha_R$ и абсолютной величины смещения ΔR реальной траектории от идеальной для различных деформаций проводников при малом возбуждении (рис. 3, *a*, *б*), что соответствует режиму работы стигматора, и при достаточно сильном возбуждении (рис. 4, *a*, *б*) для квадрупольной линзы коэффициент возбуждения $K_B = IN/\sqrt{U}$ соответствует следующим значениям силы тока I : 70 А — 0,63 Ав/√В; 50 А — 0,45 Ав/√В; 30 А — 0,27 Ав/√В; 10 А — 0,09 Ав/√В; 1 А — 9·10⁻³ Ав/√В; 0,5 А — 4,5·10⁻³ Ав/√В; 0,1 А — 0,9·10⁻³ Ав/√В (знак K_B зависит от направления тока).

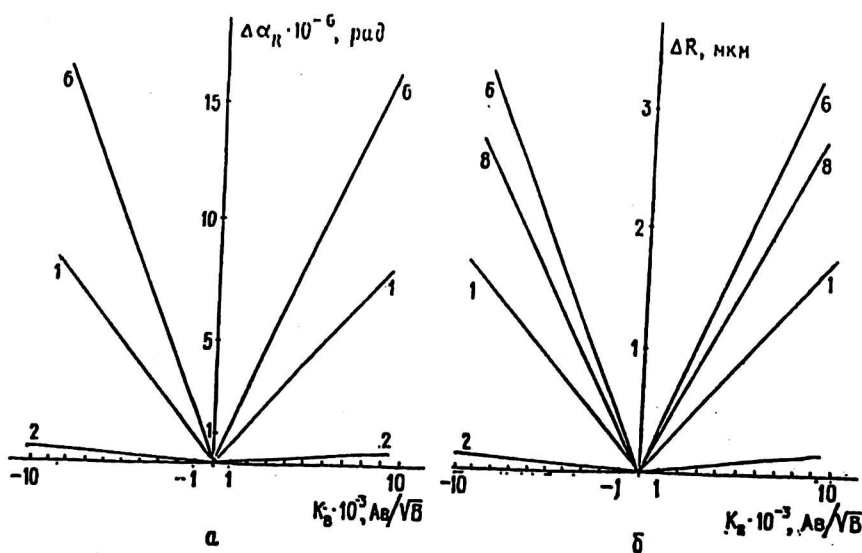


Рис. 3. График семейства зависимостей для стигматора:

a — изменения угла наклона $\Delta\alpha_R$ реальной траектории от идеальной для различных деформаций проводников при меняющемся возбуждении;

б — абсолютной величины смещения ΔR реальной траектории от идеальной для различных деформаций проводников при меняющемся возбуждении

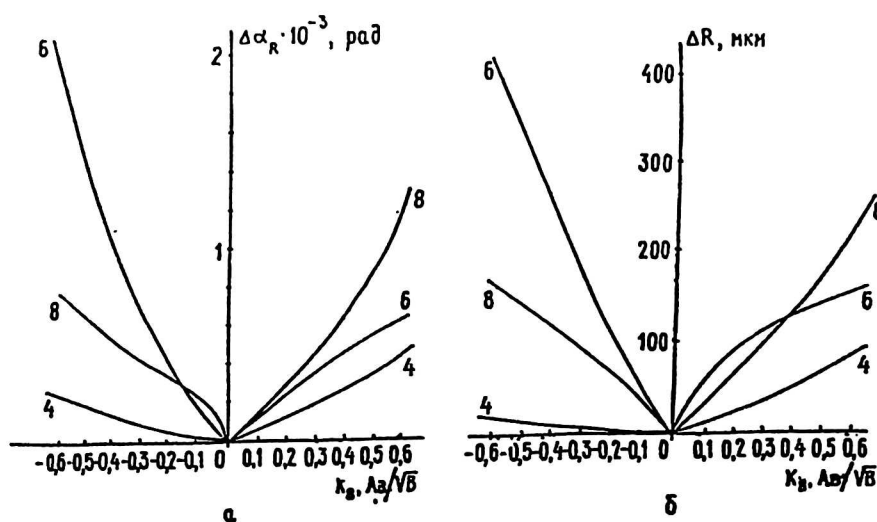


Рис. 4. График семейства зависимостей для квадрупольной линзы:

- а* — изменения угла отклонения $\Delta\alpha_R$ реальной траектории от идеальной для различных деформаций проводников при меняющемся возбуждении;
б — абсолютной величины смещения ΔR реальной траектории от идеальной для различных деформаций проводников при меняющемся возбуждении

Из рис. 3, *а*, *б* видно, что для квадрупольной линзы величина дополнительных aberrаций зависит от направления отклонения пучка. Это объясняется тем, что во всех случаях рассматривается смещение от 1 до 4 точек проводников, и если при отклонении пучок приближается к дефектному участку, то его влияние на пучок усиливается по сравнению со случаем, когда пучок удаляется от дефектного участка и движется в области, где поле определяется в основном недеформированными проводниками квадрупольной линзы. Для стигматора это несущественно из-за малых углов отклонения пучка электронов от оси. По этим же соображениям зависимости $\Delta\alpha_R$ и ΔR для стигматора носят линейный характер.

Наиболее сильно на ЭОЭ, как показал эксперимент, влияет деформация № 6 (смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по R на величину d (смещение по R)) и № 8 (смещение угловых точек 1-2 в одном направлении и точек 5-6 в другом направлении по φ на величину $\delta\varphi$ (смещение по φ)). В качестве примера в табл. 1 приведены значения ошибок по углу и координатам при различных значениях параметра возбуждения K_B для стигматора с деформацией № 6. Как видно из табл. 1 ошибка по углу может достигать $0,16 \cdot 10^{-4}$ рад и соответственно по координате — единиц микрона.

Таблица 1

Некоторые результаты для стигматора с дефектом № 6

Возбуждение ЭОЭ $K_B \cdot 10^{-3}$, A_B/\sqrt{B}	Среднеквадратичная ошибка					
	по углу, рад			по координате, мкм		
	$\Delta\alpha_x \cdot 10^{-6}$	$\Delta\alpha_y \cdot 10^{-6}$	$\Delta\alpha_R \cdot 10^{-6}$	Δx	Δy	$\Delta R_{\text{пучка}}$
-9,0	11,64	11,66	16,47	2,39	2,38	3,37
-4,5	5,80	5,80	8,20	1,19	1,18	1,68
-0,9	1,16	1,16	1,63	0,24	0,23	0,33

Окончание табл. 1

Возбуждение ЭОЭ $K_v \cdot 10^{-3}$, A_v/\sqrt{B}	Среднеквадратичная ошибка					
	по углу, рад			по координате, мкм		
	$\Delta\alpha_v \cdot 10^{-6}$	$\Delta\alpha_r \cdot 10^{-6}$	$\Delta\alpha_R \cdot 10^{-6}$	Δx	Δy	$\Delta R_{пучка}$
0,9	1,15	1,15	1,63	0,24	0,23	0,33
4,5	5,76	5,75	8,13	1,19	1,17	1,67
9,0	11,46	11,44	16,20	2,36	2,34	3,32

При изменении направления тока в ОС на противоположное ошибка по координатам и углу практически не отличается. Это объясняется тем, что в стигматоре траектории электронов проходят близко к оси, и пучок испытывает малое воздействие от деформированного участка.

В табл. 2 приведены значения ошибок по углу и координатам при различных значениях возбуждения K_v для квадрупольной линзы с дефектом № 6. Как видно из табл. 2 ошибка по углу может достигать 0,002 рад и соответственно по координате — 0,4 мм. При изменении направления тока в стигматоре на противоположное ошибка по координатам и по углу отличается в несколько раз, так как в квадрупольных линзах траектории электронов отклоняются на существенные углы (по сравнению со стигматорами) и следовательно, пучок испытывает значительное влияние деформированного участка стигматора. Такая несимметрия в технологическом оборудовании приводит к существенной ошибке позиционирования пучка в зависимости от направления отклонения.

Таблица 2

Некоторые результаты для квадрупольной линзы с дефектом № 6

Возбуждение ЭОЭ K_v , A_v/\sqrt{B}	Среднеквадратичная ошибка					
	по углу, рад			по координате, мкм		
	$\alpha_v \cdot 10^{-6}$	$\alpha_r \cdot 10^{-6}$	$\alpha_R \cdot 10^{-6}$	x	y	R
-0,63	1406,04	1449,38	2019,32	277,70	287,29	399,57
-0,45	863,74	877,20	1231,07	171,84	175,42	245,56
-0,27	443,56	445,75	628,84	89,05	90,07	126,65
-0,09	125,65	125,64	177,69	25,50	25,69	36,20
0,09	105,98	106,23	150,05	21,79	22,00	30,97
0,27	266,43	270,82	379,91	55,57	56,84	79,49
0,45	372,22	389,71	538,90	78,71	82,63	114,12
0,63	444,46	487,15	659,44	94,69	103,51	140,29

Проводились расчеты зависимости величины ошибки по углу α и по радиусу R в зависимости от характера вносимого возмущения и возбуждения ЭОЭ. Максимальное значение ошибки имеют место при смещении проводников по R и по ϕ , так как в этих случаях изменения в геометрии ЭОЭ больше, чем в случае перекоса отдельных проводников.

Изменение магнитного поля ЭОЭ наблюдается в этом случае на большем участке. При перекосе происходит частичная компенсация возмущений. При смещении проводников по оси Z происходит значительное уменьшение величины ошибок, что объясняется следующим. В начале ЭОЭ дефект из-за отсутствия одного элемента длины проводника Δl вызывает отклонение пучка электронов в одну сторону, а на выходе отсутствуют все проводники, кроме одного элемента длины проводника Δl , и происходит смещение электронов в другую сторону (т. е. как в двухэтажном ЭОЭ с двумя паразитными полями). Поэтому положение центра отклонения зависит от расстояния прохождения траекторий электронов от оптической оси.

Было показано, что ошибка позиционирования прямо пропорциональна величине смещения проводника для различных дефектов и, как видно, для квадрупольной линзы значения $\Delta\alpha_R$ и ΔR существеннее при отрицательном коэффициенте возбуждения, так как пучок приближается к дефектному участку и практически одинаковы для стигматора, где уровень возбуждения значительно ниже.

Все расчеты проводились для двух типов ЭОЭ (см. рис. 2, а, б), и их результаты показали, что влияние геометрии расположения поперечных проводников в ЭОЭ на его электронно-оптические параметры слабо выражено.

Для количественной оценки величины дополнительной аберрации, возникающей за счет дефектов, было рассмотрено ее влияние на параметры технологического оборудования. Был промоделирован режим отклонения конуса лучей, сходящихся в точку на расстоянии $L = 200$ мм, что соответствует режиму работы технологической установки для микрогравировки. В этом случае также исследовалось воздействие аналогичных 10 дефектов изготовления и 8 режимов возбуждения.

Оценивалось отклонение различных траекторий конуса от точки фокусировки идеального пучка. Порядок полученных величин дополнительных аберраций близок к данным, полученным при расчетах влияния деформаций на параллельный пучок.

Были проведены расчеты дополнительных аберраций, вызванных дефектами в случае, когда координаты всех угловых точек стигматора изменились случайным образом в пределах $\pm 0,1$ мм. Некоторые результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Некоторые результаты для стигматора со случайным распределением ошибки

Номер задачи	Среднеквадратичная ошибка					
	по углу, рад			по координате, мкм		
	$\Delta\alpha_x \cdot 10^{-6}$	$\Delta\alpha_y \cdot 10^{-6}$	$\Delta\alpha_R \cdot 10^{-6}$	Δx	Δy	$\Delta R_{\text{пучка}}$
1	25,50	11,97	28,17	4,64	2,67	5,36
2	433,32	64,04	438,03	85,28	13,53	86,34
3	166,88	201,95	261,97	32,97	42,27	53,61
4	93,37	186,40	209,83	17,28	37,74	41,51
5	40,50	4,62	40,75	5,50	2,12	5,89

Видно, что если ошибка распределяется случайным образом при том же допуске 0,1 мм, то реальные ошибки могут более чем в 5 раз превышать ошибки, вызванные смещением точек 1-4 (сравни данные табл. 1 и 3).

Выводы

1. Предложены критерии для оценки влияния различных видов дефектов стигматора и квадрупольной линзы на его оптические свойства для цилиндрического и конического пучков, входящих в ЭОЭ.

2. Рассчитаны отклонения траекторий пучков, прошедших через деформированный стигматор или квадрупольную линзу от траекторий, прошедших через недеформированный ЭОЭ для 10 вариантов возможных типовых дефектов и 8 режимов возбуждения стигматора или квадрупольной линзы.

3. Определены средние и среднеквадратичные ошибки отклонения реальных траекторий от идеальных (по 150 траекториям, равномерно распределенных по азимутальному углу и по радиусу пучка).

4. Определены дефекты, наиболее существенно влияющие на оптические характеристики, и показано, что при допуске на намотку проводников 0,1 мм абсолютная ошибка отклонения по углу может превышать $2 \cdot 10^{-3}$ рад, а средне-квадратичная ошибка позиционирования пучка — достигать десятых долей миллиметров для квадрупольной линзы и, соответственно, $1,6 \cdot 10^{-5}$ рад и единиц микрон — для стигматора.

5. Показано, что при случайном распределении ошибок по всем координатам проводников ЭОЭ суммарная ошибка может превышать более чем в пять раз значения ошибок от дефектов № 1— № 8.

Л и т е р а т у р а

1. Розенфельд Л. Б., Васичев Б. Н., Зотова М. О. Влияние неточности изготовления быстродействующих магнитных отклоняющих систем и стигматоров на симметрию создаваемых ими полей // Известия АН РАН. Сер. физ. 1999. № 7.
2. Розенфельд Л. Б., Васичев Б. Н., Зотова М. О. Моделирование и анализ aberrаций, возникающих вследствие нарушения геометрии магнитных отклоняющих систем // Там же, 2000 (в печати).
3. Хокс П., Каспер Э. Основы электронной оптики. М., 1993. Т. 2. С. 474.
4. Бонштедт Б. Э., Маркович М. Г. Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. — М.: Сов. радио, 1967. С. 272.

Simulation and analysis of aberrations, appearing as violation of high-speed magnetic stigmators and quadrupole lens

L. B. Rozenfeld

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

The methods a calculation and analysis of results the influence of tolerances on the electron-optics parameters for high-speed magnetic stigmators and quadrupole lens are presented. The value of the beam deflect and the quantity of the errors for positioning under the shift, the inclination and variation of the length and radius for magnetic stigmators and quadrupole lens are estimated.