Электронные и ионные пучки

УДК 537.543.3

Методика расчета системы динамической фокусировки для технологического электронно- и ионно-зондового оборудования

Л. Б. Розенфельд
ФГУДП «НИИ электронной и ионной оптики» ГУП «НПО "Орион"», Москва, Россия

Рассмотрены проблемы, возникающие при необходимости создания системы динамической фокусировки пучка заряженных частиц для технологического оборудования, обеспечивающей постоянство увеличения формирующей системы, что является необходимым (но недостаточным) условием постоянства диаметра пучка по всему его полю развертки. Получены аналитические выражения, позволяющие количественно оценивать диаметр отклоненного пучка (без учета аберраций отклоняющей системы) в зависимости от угла отклонения, конструкции и параметров возбуждения формирующей линзы и системы динамической фокусировки. Дано описание критерий, позволяющих рассчитывать для формирующих линз, используемых в технологическом электронно-лучевом оборудовании, системы динамической фокусировки с постоянным увеличением. Показано, что для обеспечения постоянства увеличения при больших углах отклонения необходимо использовать (как минимум) три разнесенные в пространстве линзы динамической фокусировки.

В технологическом зондовом оборудовании необходимо обеспечивать сканирование пучка заданных формы и размера по максимально возможной площади обрабатываемого изделия. При этом возникает ряд сложностей, связанных с тем, что при электронной литографии поверхность фокусировки пучка должна совпадать с плоскостью объекта по всему полю отклонения пучка. В то же время поверхность фокусировки последнего оказывается криволинейной и, естественно, не совпадает с плоскостью объекта. В результате этого несовпадения дефокусировка пучка по мере его отклонения возрастает, а плотность тока на объекте падает. В оборудовании для микрообработки электронным пучком, кроме механизма дефокусировки, действует также и другой механизм, связанный с тем, что поверхность обрабатываемого изделия может быть, например, цилиндрической или ступенчатой.

Для сохранения фокусировки пучка на поверхность обрабатываемого изделия обычно используется система динамической фокусировки. Эта система увеличивает (или уменьшает) фокусное расстояние основной линзы, формирующей на поверхности объекта изображение кроссовера (или фигурной диафрагмы), в соответствии с изменением длины пути до объекта при отклонении пучка. Нетрудно показать (используя формулу Ньютона), что для обеспечения фокусировки зависимость изменения фокусного расстояния от приращения пути должна иметь следующий вид:

$$F = \frac{F_0 + \dfrac{a\,\delta b + b\,\delta a + \delta b \delta a}{a+b}}{1 + \dfrac{\delta a + \delta b}{a+b}}, \qquad (1)$$

© Розенфельд Л. Б., 2002

где F_0 и F — величины фокусных расстояний, обеспечивающих фокусировку неотклоненного и отклоненного пучков, соответственно;

a и $a_1 = a + \delta a$, b и $b_1 = b + \delta b$ — расстояния предмета и изображения от главных плоскостей линзы (или системы линз) для неотклоненного и отклоненного пучков, соответственно.

В случае, если формирующую линзу можно считать тонкой, расстояния a и b отсчитываются от центра линзы, при этом увеличение системы описывается выражением

$$M = (b + \delta b) / F - 1 .$$

Осуществлять необходимую фокусировку при отклонении пучка можно, изменяя возбуждение объектива. Однако из-за большой индуктивности, обычно используемой в электронно-лучевом оборудовании магнитной объективной линзы, и медленно затухающих в сплошном магнитопроводе токов Фуко время установления магнитного поля оказывается порядка десятых долей секунды. Кроме того, гистерезис материала магнитопровода нарушает воспроизводимость фокусировки. Поэтому для повышения быстродействия системы динамической фокусировки и воспроизводимости ее работы обычно в центре магнитной линзы, проецирующей изображение источника электронов на обрабатываемое изделие, устанавливается вспомогательная линза (электростатическая линза или катушка подфокусировки), уменьшающая оптическую силу основной линзы по мере возрастания отклонения пучка. При этом в случае, если объективную линзу можно считать тонкой, во всех режимах расстояние a от предмета до линзы остается постоянным и, следовательно (согласно известному выражению для увеличения линзы $M = b/a$), с ростом отклонения пучка растет увеличение формируемого изображения. Нетрудно показать, что в случае тонкой линзы изменение увеличения в этом случае описывается формулой

$$M / M_0 = 1 + \delta b / b ,$$

где M_0 — увеличение для неотклоненного пучка.

Так как у электронных линз положение главных плоскостей является обращенным и при уменьшении оптической силы линзы обе главные плоскости смещаются к ее центру*, то при увеличении фокусного расстояния величина a для толстой линзы даже уменьшается. При изменении этих расстояний (a и b) увеличение изменяется по закону

$$M = M_0 \frac{(1 + \delta\, b / b)}{(1 + \delta\, a / a)} . \qquad (2)$$

Очевидно, что постоянство увеличения обеспечивается только в том случае, если дробь в выражении (2) равна 1. Это происходит при выполнении соотношения

$$\delta a/a = \delta b/b = p, \qquad (3)$$

где p — некая константа.

Используя выражение (1), нетрудно также показать, что для обеспечения режима фокусировки при измененных (в соответствии с соотношением (3) значениях a и b необходимо изменить также фокусное расстояние линзы на величину δF, определяемую соотношением

$$\delta F/F_0 = \delta a/a = \delta b/b. \qquad (4)$$

* Глазер В. Основы электронной оптики. — М.: Госуд. изд-во науч.-техн. лит-ры, 1957.

Из (4) следует, что для обеспечения фокусировки при постоянстве увеличения необходимо одновременно изменять три параметра оптической системы: отрезки a и b, а также фокусное расстояние линзы, т. е. система динамической фокусировки должна смещать обе главные плоскости линзы. (В случае тонкой линзы изменение отрезка a означает необходимость физического перемещения линзы). При этом из (4) следует, что если объективная линза работает с уменьшением, то $\delta a > \delta b$, так как $a > b$. Очевидно, что одна линза динамической фокусировки, размещенная в максимуме поля объективной линзы, не может обеспечить изменение отрезка a. По-видимому, одна линза динамической фокусировки (даже смещенная относительно максимума поля объективной линзы) не может обеспечить одновременное изменение необходимым образом трех величин: фокусного расстояния и расстояний предмета и изображения (a и b) от двух главных плоскостей: для независимого изменения трех величин в общем случае необходимы три регулировочных элемента, один из которых изменяет оптическую силу основной линзы (объектива) и располагается в ее центре, а остальные изменяют положение главных плоскостей (при этом также влияя и на оптическую силу системы).

Оценим порядок величин необходимого изменения вышеуказанных параметров при отклонении на угол φ. Для предварительной количественной оценки влияния отклонения пучка на размер пятна на мишени при использовании динамической подфокусировки примем в первом приближении, что поверхность точной фокусировки пучка есть сфера радиуса R, касающаяся поверхности объекта в точке пересечения поверхности объекта с осью линзы. Тогда из чисто геометрических соображений получаем

$$p = \delta b / b = \frac{R}{b}\left(\frac{1-\cos\varphi}{\cos\varphi}\right). \tag{5}$$

График функции

$$K(\varphi) = \left(\frac{1-\cos\varphi}{\cos\varphi}\right) \tag{6}$$

приведен на рисунке. Учитывая, что смещение пучка на мишени X и угол отклонения связаны соотношением $X = R\ \mathrm{tg}\varphi$, выражение для K можно преобразовать к удобном в ряде случаев виду

$$K(X) = \sqrt{1+(X/R)^2} - 1. \tag{7}$$

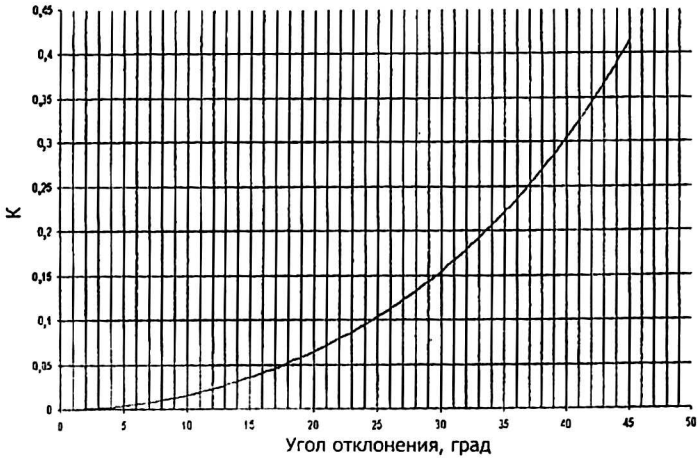

График функции $K(\varphi)$

В общем случае, когда поверхность точной фокусировки отклоненного пучка не является сферой ($R = R(\varphi)$), формулы (5)—(7) могут быть использованы в качестве первого приближения, а дальнейший расчет системы должен проводиться траекторным методом (с учетом оптических характеристик системы отклонения пучка, а также с учетом наложения полей объектива и элементов системы динамической фокусировки) путем вычисления для каждого угла отклонения величины δb и соответствующего для нее режима коррекции.

Рассмотрим в качестве примера технологическую установку, в которой a = 600 мм, b = 200 мм (M_0 = 0,333). Пусть угол отклонения равен 20° и пусть (для простоты) $R = b$. Если не изменять величину a в процессе динамической фокусировки, то при отклонении на 20° на краю поля отклонения радиус пучка только за счет изменения увеличения формирующей линзы возрастет на 6,5 % , что приведет к падению плотности тока на 13,4 %. При отклонении на 30° радиус возрастет на 15,5 %, а плотность тока снизится на 33,4 %. Очевидно, что такие изменения формируемого на мишени сечения пучка могут существенно повлиять на технологический процесс.

Оценим (применительно к той же технологической установке) требования к системе динамической фокусировки, обеспечивающей постоянство увеличения при отклонении пучка. Используя формулу Ньютона, находим, что F_0 = 150 мм. Из соотношений (5)—(7) (или по графику) и по формулам (3) и (4) находим, что при угле отклонения 20° K = 0,064; δb = 12,8 мм; δa = 38,5 мм; δF = 9,6 мм (при этом отклонение пучка от центра поля обработки составляет 72,8 мм). При угле отклонения 30° K = 0,155; δb = 30,9 мм; δa = 92,7 мм; δF = 23,25 мм.

Как видно из приведенных цифр, для обеспечения постоянства увеличения необходимо изменять расстояния от главных плоскостей линзы до изображения и до предмета на достаточно большую величину (при отклонении 30° — на 38,5 и 92,7 мм, соответственно). Очевидно, что для реализации динамической фокусировки с постоянным увеличением при таком большом угле отклонения необходимо использовать независимо регулируемые, сильные и достаточно далеко разнесенные в пространстве линзы динамической фокусировки. Как показывают численные эксперименты, комбинация из трех линз для динамической фокусировки позволяет почти независимо изменять положения главных плоскостей и величину фокусного расстояния формирующей линзы. Это позволяет обеспечить режим постоянства диаметра пучка по всему полю развертки.

Таким образом, полученные аналитические выражения позволяют рассчитывать систему динамической фокусировки с постоянным увеличением для формирующих линз, используемых в технологическом электронно-лучевом и ионно-лучевом оборудовании.

Procedure of calculation of the dynamic focusing systems for technological electron beam and ion beam devices

L. B. Rozenfeld
Research Institute for Electron & Ion Optics, Moscow, Russia

The problems of construction of the dynamic focusing systems for electron beam (or ion beam) technological devices, providing constant value of beam diameter on all scanning field on the object, are discussed. Analytical expressions for calculation such systems are proposed. It is shown, that for providing constant value of magnification at big angles of beam deflection it is necessary to use (as a minimum) three dynamic lenses.