

## Ахроматические дефлектроны из совмещенных электродов-полюсов

© Л.П. Овсянникова,<sup>1</sup> Т.Я. Фишкова,<sup>1</sup> И.А. Петров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Applied Materials, GEM Business Unit, 74103 Nes-Ziona, Israel  
e-mail: L.Ovsyannikova@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 23 марта 2001 г.)

Предложена комбинированная электромагнитная отклоняющая система из четырех либо восьми электродов, являющихся одновременно полюсами. Получено распределение потенциала в таких системах и численно рассчитаны параметры центральной траектории пучка в ахроматических режимах работы. Найдены иные, отличные от классического, соотношения между электростатической и магнитной составляющими напряженности поля, которые обеспечивают меньшую остаточную хроматическую aberrацию и одновременно более высокую линейность отклонения.

В растровых электронных микроскопах, электронно-лучевых приборах, в методиках вторично-ионной и атомной масс-спектрометрии и др. для создания раstra на поверхности образца используются главным образом электростатические отклоняющие в произвольном направлении системы с пространственно совмещенными центрами отклонения — так называемые дефлектроны. Они не оказывают (в первом приближении) дефокусирующего действия на пучок заряженных частиц, т. е. не нарушают его расходимость. Электростатические дефлектроны выполняются в виде цилиндра или конуса, разрезанного по образующим на четное число частей [1,2] в виде плоских электродов, расположенных по сторонам прямоугольной (квадратной) коробки [3], а также в виде разрезанного плоского конденсатора [4].

Во многих приборах и физических установках требуется отклонять одинаковым образом пучки, в которых имеется разброс по энергии. Известно, что для создания ахроматических систем используются взаимно перпендикулярные электростатические и магнитные поля. Условие ахроматизма в первом приближении записано нами в общем виде из уравнения траектории без конкретизации типов полей при следующих условиях: 1) одинаковое действие электростатического и магнитного полей на пучок заряженных частиц (отклонение, фокусировка, коррекция различного рода aberrаций); 2) пространственная совмещенность поперечных по отношению к движению заряженных частиц взаимно перпендикулярных электростатического и магнитного полей; 3) постоянство продольной скорости частиц в пределах поля. При этом, дифференцируя по энергии правые части проекций уравнения траектории на плоскости  $xoz$  и  $yoz$  и приравнивая полученные выражения нулю, получим в нерелятивистском приближении условие ахроматизма первого порядка

$$v/c = 2E_x/H_y = -2E_y/H_x. \quad (1)$$

Здесь  $v$  и  $c$  — скорости заряженных частиц и света;  $E$  и  $H$  — напряженности электростатического и магнитно-

го полей в соответствующих плоскостях, направленные в противоположные стороны.

Целью настоящей работы являются теоретическое исследование комбинированных дефлектронов с регулируемой по величине и знаку поперечной хроматической aberrацией, а также ее коррекция. Конструктивно такие дефлектроны выполнены в виде цилиндра из магнитного материала, разрезанного по образующим на четыре и восемь частей с малыми зазорами между ними. При этом электроды являются одновременно полюсными наконечниками магнита. На рис. 1 схематично даны поперечные сечения комбинированных дефлектронов из четырех и восьми электродов-полюсов. При этом в системе из четырех частей осуществляется подача лишь двух пар основных электростатических  $\pm V_x, \pm V_y$  и магнитных  $\mp W_y, \pm W_x$  потенциалов (рис. 1, *a*), а в системе из восьми пар необходимо подавать дополнительные потенциалы, служащие для улучшения степени однородности поля и определяемые коэффициентом  $a$  (рис. 1, *b*). Он получен в работе [1] из условия обращения в нуль коэффициентов при третьей и пятой гармониках в разложении потенциала (величина  $a = \sqrt{2} - 1$ ).

Распределение потенциала отклоняющих систем получено нами в замкнутой форме с учетом результатов работ [5,6]. Внутри бесконечно длинного цилиндра, разрезанного по образующим на четыре одинаковые части

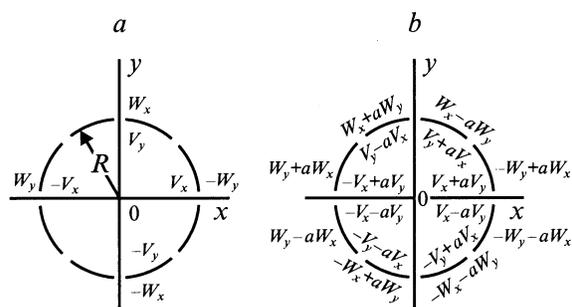


Рис. 1. Комбинированные электромагнитные дефлектроны из четырех (а) и восьми (б) одинаковых электродов-полюсов.

(рис. 1, а), в декартовой системе координат оно имеет вид

$$\Phi(4) = 1/\pi \left\{ (V_x + V_y) \operatorname{arctg} [\sqrt{2}(x+y)/(1-x^2-y^2)] + (V_x - V_y) \operatorname{arctg} [\sqrt{2}(x-y)/(1-x^2-y^2)] \right\}. \quad (2)$$

Здесь и в дальнейшем координаты выражены в единицах радиуса цилиндра  $R$ . Для восьмиэлектродного дефлектора (рис. 1, б) получено

$$\Phi(8) = (1-a)\Phi(4) + 2a/\pi \left\{ V_x \operatorname{arctg} [2x/(1-x^2-y^2)] + V_y \operatorname{arctg} [2y/(1-x^2-y^2)] \right\}. \quad (3)$$

При  $a = 0$  выражение (3) переходит в (2).

В случае пространственного совмещения полюсов с электродами в комбинированной отклоняющей системе выражения для распределения магнитных скалярных потенциалов могут быть получены из (2), (3) при замене  $V_x$  на  $(-W_y)$  и  $V_y$  на  $W_x$ . При этом силы соответствующих электростатических и магнитных полей действуют в противоположных направлениях.

В предыдущей работе авторов [2] приведены результаты расчета неоднородности электростатических полей четырех- и восьмиэлектродных дефлекторов в зависимости от расстояния до их осей, которые получены на основании вышеприведенных формул распределения потенциалов (2), (3). Следует отметить, что для явнопольных магнитных систем неоднородность соответствующих магнитных полей совпадает по величине с неоднородностью электростатических полей. Поскольку aberrации отклонения зависят от поля, то на основании этих данных можно судить о величине угла отклонения, которая определяется максимально допустимой неоднородностью поля.

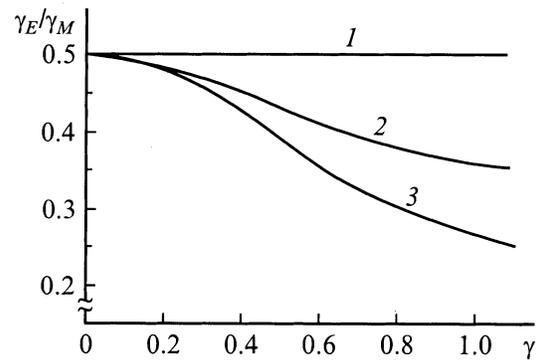
В плоскости объекта, расположенного вне поля, расстояние центральной траектории пучка от оси системы, угол ее наклона к оси, а также хроматические aberrации в горизонтальной и вертикальной плоскостях в первом приближении одинаковы и имеют вид

$$s_1 = \gamma g, \quad s'_1 = \gamma, \quad \Delta s_1 = (\gamma_E - \gamma_M/2)g\Delta\varepsilon/\varepsilon_0, \quad \Delta s'_1 = (\gamma_E - \gamma_M/2)\Delta\varepsilon/\varepsilon_0, \quad (4)$$

где  $\gamma = \gamma_M - \gamma_E$  — сила комбинированного электромагнитного дефлектора, равная тангенсу угла отклонения центральной траектории пучка;  $\gamma_E$  и  $\gamma_M$  — ее электростатическая и магнитная составляющие, равные

$$\gamma_E = (K_{1E}eV/2\varepsilon_0)(L/R), \quad \gamma_M = K_{1M}eWc^{-1}(2m\varepsilon_0)^{-1/2}(L/R). \quad (5)$$

Здесь  $\varepsilon_0$  и  $\Delta\varepsilon$  — начальная энергия частиц с зарядом  $e$  и массой  $m$  и величина ее изменения соответственно;  $g$  — расстояние от центра дефлектора до

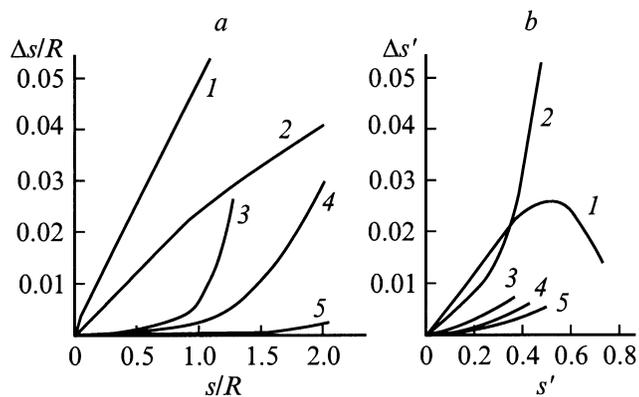


**Рис. 2.** Зависимость соотношения электростатической и магнитной составляющих сил от силы комбинированного дефлектора, обеспечивающего ахроматизм первого порядка (1), а также расширение области ахроматизма (2, 3).

объекта;  $L$  — эффективная длина поля;  $K_1$  — коэффициенты при первой гармонике в разложении потенциала. Для дефлектора из четырех электродов-полюсов они равны  $K_{1E} = K_{1M} = 2\sqrt{2}/\pi$ , из восьми —  $K_{1E} = K_{1M} = 8(\sqrt{2} - 1)/\pi$ . Из формул (1) видно, что хроматическую aberrацию можно регулировать по величине и знаку. Она равна нулю, если электростатическая сила вдвое меньше магнитной.

Траектории пучка заряженных частиц в комбинированных отклоняющих системах определялись численно по написанной авторами программе DEF. Она решала систему дифференциальных уравнений второго порядка, в которые входят напряженности полей, определяемые из точных выражений распределения потенциалов (2), (3), а также сами эти потенциалы. При этом распределение поля на оси дефлекторов задавалось эмпирическими формулами, полученными нами в работе [2]. Рассчитывались короткие и длинные дефлекторы из четырех электродов-полюсов, поскольку их aberrации больше (при прочих равных условиях), чем у отклоняющих систем из восьми электродов-полюсов.

При классическом соотношении электростатической и магнитной составляющих сил  $\gamma_E/\gamma_M = 1/2$  ахроматизм достигается лишь при малых отклонениях (менее  $7^\circ$ ). При увеличении отклонения остаточная хроматическая aberrация сильно возрастает. Нами показано, что область ахроматичности можно расширить путем изменения соотношения  $\gamma_E/\gamma_M$ . На рис. 2 приведены соотношения электростатической и магнитной составляющих сил ахроматического дефлектора, обеспечивающего одинаковую с электростатическим дефлектором величину отклонения на выходе из поля. Интересно отметить, что эта зависимость одинакова для дефлекторов с разными длинами  $l = 2R$  и  $l = 4R$ . Кривая 2 на рис. 2 относится к случаю, когда электростатическая составляющая силы ахроматического дефлектора равна силе чисто электростатического (режим II). Кривая 3 получена при варьировании электростатической и магнит-



**Рис. 3.** Хроматические aberrации координат (а) и углов отклонения (б) коротких дефлектронов на выходе из поля для центральной траектории пучка: 1 — электростатический дефлектор; 2 — магнитный; 3–5 — ахроматические.

ной составляющих одновременно (режим III). Видно, что при больших отклонениях отношение  $\gamma_E/\gamma_M$  достаточно сильно отличается от классического (режим I, прямая 1). Отметим, что величины электростатической и магнитной составляющих силы в ахроматических режимах II и III меньше, а величины отклонения при этом больше, чем в классическом режиме I.

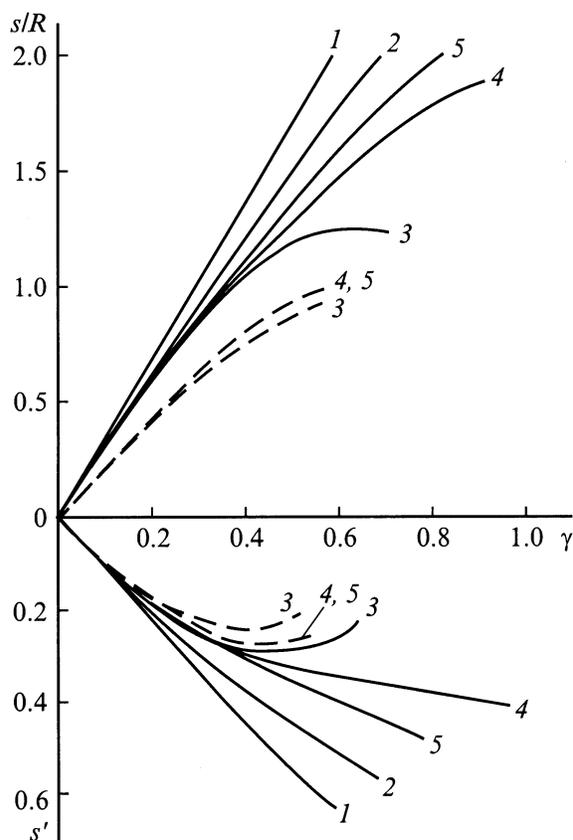
На рис. 3 приведены результаты расчета хроматической aberrации координаты  $\Delta s$  и угла отклонения  $\Delta s'$  коротких дефлектронов при разбросе по энергии  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0 = 5\%$ . Кривые 1 относятся к электростатическому, кривые 2 — к магнитному дефлекторам. Для найденных режимов II и III остаточная хроматическая aberrация представлена кривыми 4 и 5 соответственно. Из рисунка видно насколько лучше предлагаемые режимы по сравнению с классическим ахроматом (кривые 3). Для длинного дефлектрона найденные режимы также обеспечивают расширение области ахроматичности. При этом остаточные aberrации с увеличением отклонения уменьшаются в 4–10 раз по сравнению с классическим режимом.

На рис. 4 приведены величины координат и углов наклона центральной траектории пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях для короткого ( $l = 2R$ ,  $L = 2.56R$ ) и длинного ( $l = -4R$ ,  $L = 4.34R$ ) дефлектронов на выходе из поля в зависимости от силы электростатического, магнитного и ахроматических дефлектронов в случае  $\varepsilon_0 = \text{const}$ . Видно, что для углов отклонения менее  $7^\circ$  эти зависимости носят практически линейный характер и одинаковы для всех типов дефлектронов. Следует отметить, что максимально достижимый угол отклонения приблизительно обратно пропорционален длине дефлектрона и в длинном дефлектроне он меньше, чем в коротком, так как пучок раньше садится на электроды системы. Кроме того, для длинных дефлектронов нелинейность отклонения в слабых режимах больше, а в сильных меньше, чем у коротких дефлектронов.

В целом нелинейности отклонения по углу и координате в ахроматических дефлектронах больше, чем у электростатических и магнитных в отдельности. Причем в классическом ахроматическом дефлектроне она столь велика, что ограничивает максимально достижимые величины линейного и углового отклонений. Так, в коротком дефлектроне  $s_{\text{max}} = 1.25R$  и  $s'_{\text{max}} = 0.3$ .

Вообще говоря, нелинейность отклонения складывается из aberrаций отклонения, определяемых разностью  $(s - s_1)$  при  $\varepsilon_0 = \text{const}$ , и хроматическими aberrациями. Сравнение величин этих aberrаций показало, что при  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0 < 5\%$  aberrации отклонения существенно выше. Поэтому при формировании растров больших размеров, когда рабочая область превышает 0.7 апертуры, использование четырехэлектродных ахроматических дефлектронов нецелесообразно и следует переходить к дефлектронам из восьми электродов-полусов, в которых aberrации отклонения в значительной степени скорректированы.

Найденные ахроматические режимы представляют интерес для приборов, где сканирование осуществляется не по всему растру, а в небольшой области при значительных углах наклона пучка по отношению к объекту. В качестве примера приведем режим сканирования объекта в



**Рис. 4.** Координаты и углы наклона центральной траектории пучка в зависимости от силы короткого (сплошные кривые) и длинного (штриховые кривые) дефлектронов. 1–5 — то же, что на рис. 3.

Режим	$\gamma$	$S$	$\Delta z/R$	$\xi$
I	0.50	0.30	0.70	1.8
II	0.46	0.32	1.40	1.3
III	0.44	0.33	1.50	1.3

плоскости, расположенной параллельно оси дефлектора на расстоянии  $s = 1.2R$ , при изменении силы в интервале  $\Delta\gamma = \pm 0.1$ . За показатель нелинейности отклонения  $\xi$  принято отношение изменения продольной координаты  $dz/d\gamma$  в крайних точках указанного интервала. Отклонение линейно, если  $\zeta = 1$ . Расчет проведен с учетом изменения начальной энергии  $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0 = 5\%$ . Результаты расчета представлены в таблице, где через  $\Delta z$  обозначен размер области сканирования.

Из таблицы видно, что наилучшими в отношении нелинейности отклонения и размера области сканирования оказываются дефлекторы с расширенной областью ахроматизма (режимы II, III).

## Заключение

1. Предложена конструкция ахроматических отклоняющих в произвольных направлениях систем в виде цилиндра, разрезанного по образующим на четное число частей, которые используются одновременно как полюса и электроды.

2. В общем виде для отклоняющих, фокусирующих и корректирующих систем с поперечными электромагнитными полями записаны условия ахроматизма первого порядка.

3. Написана программа расчета параметров комбинированных электромагнитных отклоняющих систем конечной длины с учетом точных выражений распределения потенциалов (в двумерном приближении) и предложенной модели краевого поля.

4. Численно рассчитаны параметры центральной траектории пучка, в том числе хроматическая абберация, на примере дефлектора из четырех электродов-полюсов.

5. Предложен способ увеличения области ахроматизма при отклонении путем нахождения иного по сравнению с классическим соотношения величин электростатической и магнитной составляющих силы комбинированной отклоняющей системы.

6. Рассчитаны режимы с расширенной областью ахроматизма, обеспечивающие существенно меньшую нелинейность отклонения по сравнению с классическим ахроматом первого порядка.

7. Показано, что такие режимы целесообразно использовать при дискретном сканировании образцов.

## Список литературы

- [1] Kelly J. // Adv. in Electr. & Electron. Phys. 1977. Vol. 43. P. 116–130.
- [2] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 8. С. 104–107.
- [3] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 7. С. 1348–1353.
- [4] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1176–1180.
- [5] Страшкевич А.М. Электронная оптика электростатических систем. М.; Л.: Энергия, 1966. С. 141.
- [6] Баранова Л.А., Нарылков С.Г., Явор С.Я. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 9. С. 1872.