01;10

Шестиэлектродный дефлектрон

© Л.П. Овсянникова, Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: L.Ovsyannikova@pop.ioffe.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 20 июля 1999 г.)

В замкнутой форме в двумерном приближении найдено распределение потенциала дефлектрона из шести электродов, ранее предложенного авторами. Рассчитана неоднородность его поля. Численно получено распределение поля на оси дефлектронов конечной длины, для которых подобраны аналитические формулы. Рассчитана нелинейность отклонения осевой траектории пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях на максимально возможный угол, определяемый геометрией системы. Проведено сравнение с четырех- и восьмиэлектродными дефлектронами.

В растровых электронных микроскопах, электронно-лучевых приборах, дифрактометрах на быстрые и медленные электроны, в методиках вторично-ионной и атомной масс-спектрометрии и др. для создания растра на образце используются электростатические отклоняющие в произвольном направлении системы с пространственно совмещенными центрами отклонения — так называемые дефлектроны. Они не оказывают (в первом приближении) фокусирующего действия на пучки заряженных частиц. Основным требованием, предъявляемым к таким системам, является наличие в рабочей области поля максимально возможной однородности.

Конструктивно электростатические дефлектроны чаще всего выполняются в виде цилиндра или конуса, разрезанного по образующим на четное число ветвей [1,2], в виде плоских электродов, расположенных по сторонам прямоугольной (квадратной) коробки [3,4], а также в виде разрезанного плоского конденсатора [5,6].

В работе [7] нами предложен шестиэлектродный дефлектрон с одинаковыми угловыми размерами электродов, равными $\pi/3$ (при условии бесконечно малых зазоров между ними), которые расположены на цилиндрической (конической) поверхности. Его поперечное сечение представлено на рис. 1. Если записать распределение потенциала внутри бесконечно длинного разрезанного по образующим цилиндра в виде ряда в декартовой системе координат, то при предложенном авторами способе подачи питающих напряжений (как это указано на рис. 1) коэффициенты в разложении потенциала шестиэлектродного дефлектрона таковы:

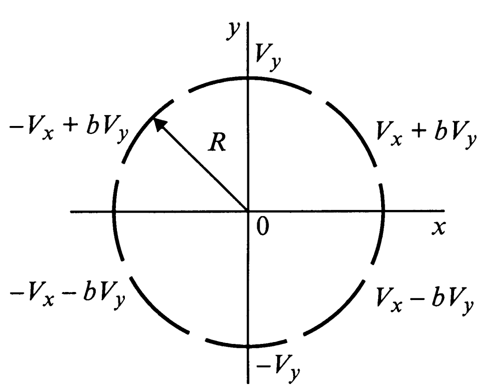

Рис. 1. Поперечное сечение шестиэлектродного дефлектрона.

$$K_{(2n-1)x} = 4/\pi/(2n-1)\sin\left[(2n-1)\pi/3\right],$$

$$K_{(2n-1)y} = 4/\pi/(2n-1)\left\{b+(1-b)\cos\left[(2n-1)\pi/3\right]\right\}. \quad (1)$$

Из этих выражений следует, что $K_{3x} = 0$ всегда, а $K_{3y} = 0$ только при $b = 0.5$. При этом по сравнению с обычно применяемым четырехэлектродным дефлектроном шестиэлектродный имеет более высокую степень однородности поля. В соответствии с формулой (1) коэффициент при старшем члене, ответственный за чувствительность отклонения в горизонтальном направлении, равен $K_{1x} = 2\sqrt{3}/\pi$, а в вертикальном — $K_{1y} = 3/\pi$. Поэтому для получения одинаковой величины отклонения в обоих направлениях питающие напряжения должны быть связаны между собой следующим образом: $V_x/V_y = \sqrt{3}/2$.

Распределение потенциала в замкнутой форме шестиэлектродного дефлектрона со скорректированными третьими гармониками в разложении потенциала имеет следующий вид:

$$\Phi(6) = 1/\pi\left\{(V_x + 1/2V_y)\,\mathrm{arctg}\left[(\sqrt{3}+y)/(1-x^2-y^2)\right]\right.$$
$$+ (V_x - 1/2V_y)\,\mathrm{arctg}\left[(\sqrt{3}x - y)/(1-x^2-y^2)\right]$$
$$\left.+ V_y\,\mathrm{arctg}\left[2y/(1-x^2-y^2)\right]\right\}. \quad (2)$$

Здесь и в дальнейшем координаты x и y выражены в единицах радиуса цилиндра R. Составляющие напряженности поля такого дефлектрона равны

$$E_x(6) = -1/(\pi R)\left\{(V_x + 1/2V_y)\left[\sqrt{3}(1+x^2-y^2)\right.\right.$$
$$\left.+ 2xy\right]/\left[(1-x^2-y^2)^2 + (\sqrt{3}x+y)^2\right] + (V_x - 1/2V_y)$$
$$\times\left[\sqrt{3}(1+x^2-y^2) - 2xy\right]/\left[(1-x^2-y^2)^2 + (\sqrt{3}x-y)^2\right]$$
$$\left.+ 4V_yxy/\left[(1-x^2-y^2)^2 + 4y^2\right]\right\},$$

$$E_y(6) = -1/(\pi R)\{(V_x + 1/2V_y) \times [1 - x^2 + y^2 + 2\sqrt{3}xy]/[(1 - x^2 - y^2)^2 + (\sqrt{3}x + y)^2] - (V_x - 1/2V_y)[1 - x^2 + y^2 - 2\sqrt{3}xy]/[(1 - x^2 - y^2)^2 + (\sqrt{3}x - y)^2] + 2V_y[(1 - x^2 + y^2)/ /[(1 - x^2 - y^2]^2 + 4y^2]\}. \quad (3)$$

Из выражений (3) следует, что при $V_x/V_y = \sqrt{3}/2$ составляющие напряженности поля на оси равны $E_x(x = y = 0) = E_y(x = y = 0) = E_h$, где E_h — напряженность соответствующего однородного поля.

На рис. 2 приведена неоднородность поля ΔE, отнесенная к напряженности однородного поля, в зависимости от расстояния до оси для шестиэлектродного дефлектрона, рассчитанная с использованием формул (3) (кривые *2*). Для сравнения даны неоднородности полей простейшего четырехэлектродного дефлектрона с угловыми размерами электродов $\pi/2$ (кривые *1*), а также восьмиэлектродного с угловыми размерами $\pi/4$, предложенного в работе [2] (кривые *3*). Задавая величину неоднородности поля, требуемую для решения той или иной задачи, можно определить величину максимально возможного удаления траектории от оси системы, что в конечном счете определяет угол отклонения. Так, при $\Delta E/E_h = 0.1\%$ удаление от оси не должно превышать для четырехэлектродного дефлектрона $0.02R$, для шестиэлектродного — $0.17R$, для восьмиэлектродного — $0.25R$. Следует отметить, что для двух последних разница невелика и во многих случаях шестиэлектродный дефлектрон не уступает восьмиэлектродному. Ниже это будет показано на основании траекторного анализа путем определения нелинейности отклонения на одинаковые углы.

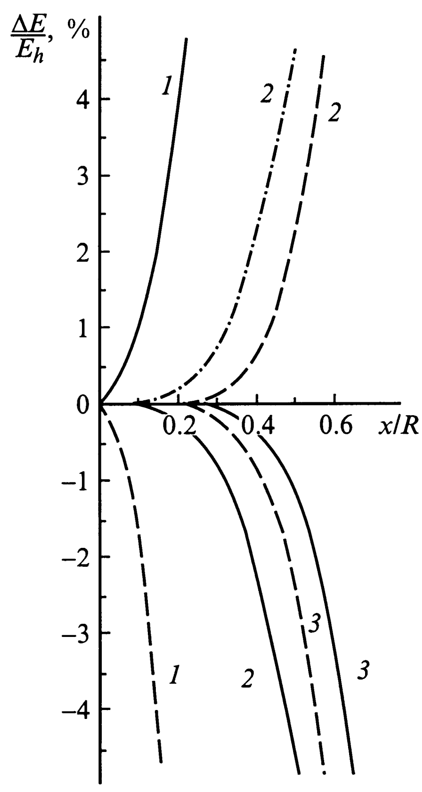

Рис. 2. Неоднородность поля электростатических дефлектронов. Сплошные кривые — отклонение в направлении оси x, штрихпунктир — в направлении оси y, штриховые — по диагонали.

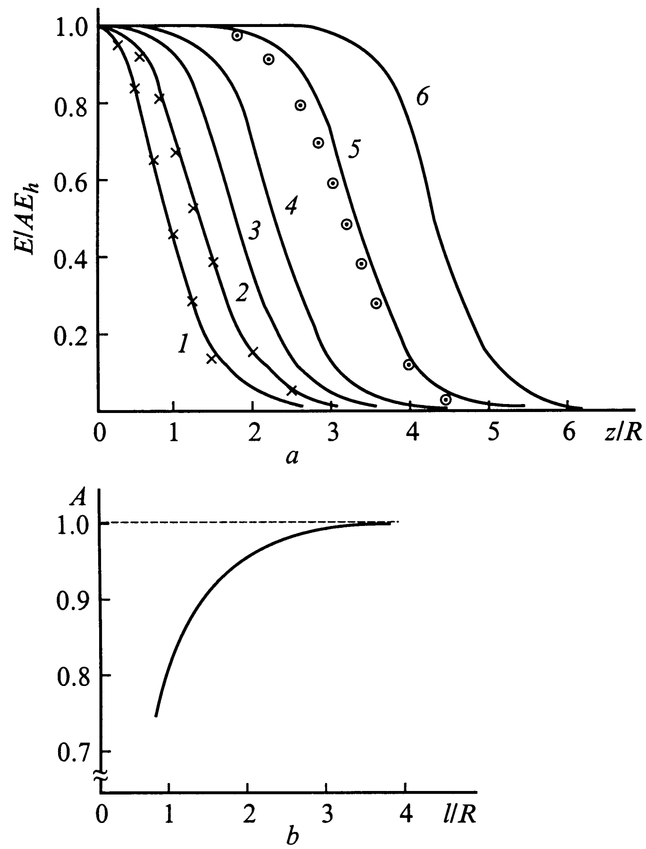

Рис. 3. *a* — напряженность поля дефлектронов различной длины (l/R: *1* — 1, *2* — 2, *3* — 3, *4* — 4, *5* — 6, *6* — 8); *b* — коэффициент, определяющий величину напряженности поля в центре системы.

Распределение поля вдоль оси в приосевой области любых дефлектронов совпадает с полем плоского конденсатора, если они имеют одинаковую длину и межэлектродное расстояние. Оно было рассчитано численно (при расположении дефлектрона в свободном пространстве) по программе ТЕО [8]. Результаты расчета напряженности поля на продольной оси дефлектронов различной длины, отнесенной к напряженности поля в центре AE_h, даны на рис. 3, *a*. Величина коэффициента A, зависящая от длины дефлектрона, представлена на рис. 3, *b*. На основании приведенных на рис. 3 данных была подобрана аналитическая формула для распределения поля. Для коротких дефлектронов с длиной $1 \leqslant l/R \leqslant 2$ она имеет вид

$$E(z) = AE_h \cos^3(Bz/R), \quad (4)$$

где $B = 0.9 - 0.2l/R$.

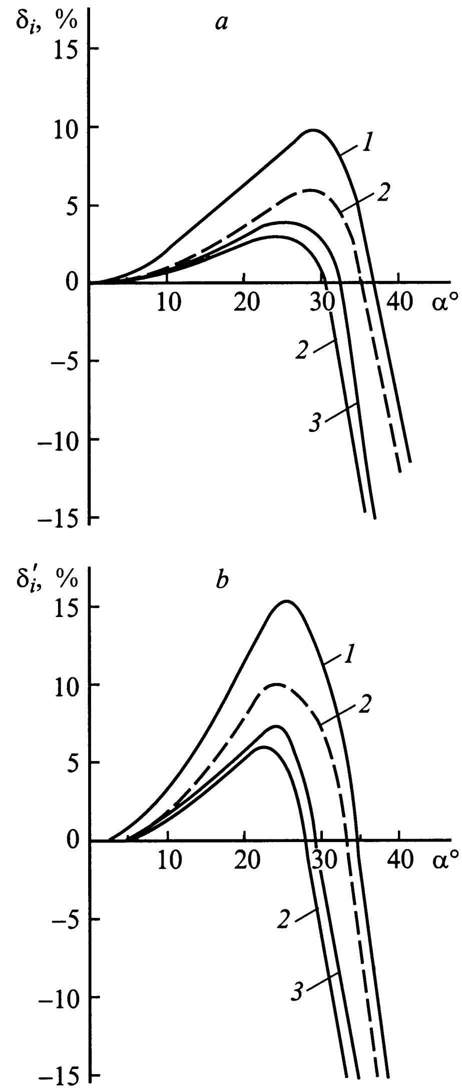

Рис. 4. Нелинейность отклонения по координате (a) и по углу (b) осевой траектории пучка на выходе дефлектронов длиной $l = 2R$: *1* — четырехэлектродный дефлектрон, *2* — шестиэлектродный, *3* — восьмиэлектродный. Сплошные кривые — отклонения в направлении оси x, штриховые — в направлении оси y.

Начало координат $z = 0$ совпадает с центром дефлектрона. На рис. 3, a распределение поля, рассчитанное по формуле (4), обозначено крестиками. Для длинных дефлектронов с $l/R > 3$ коэффициент $A = 1$. При этом появляется участок с $E_h = \text{const}$, протяженность которого зависит от длины системы. Для него найдена эмпирическая формула

$$z_0/R = l/R - 2.8. \qquad (5)$$

Кроме того, у длинных дефлектронов существует краевое поле, практически не зависящее от его длины, которое может быть записано в простом виде

$$E_k = E_h \cos^2[z/(2R)]. \qquad (6)$$

Краевое поле, рассчитанное по формуле (6), отмечено на рис. 3, a точками в кружках. На основании выражений (4)–(6) были найдены эффективные длины дефлектронов. Для коротких систем эффективная длина равна

$$L = 2 \int\limits_0^{\pi/(2B)} \cos^3(Bz/R)dz = 4R/(3B), \qquad (7)$$

для длинных

$$L = z_0 + 2 \int\limits_0^{\pi} \cos^2(z/2R)dz = l + 0.3R. \qquad (8)$$

Траектории пучка заряженных частиц в отклоняющих системах рассчитывались численно по программе DEF. Она написана нами с использованием системы автоматизации математических расчетов MathCAD. В рамках этой программы каждое уравнение второго порядка сводится к системе из двух дифференциальных уравнений первого порядка. Погрешность при решении составляет 10^{-6}.

По программе DEF были рассчитаны осевые траектории пучков в коротком и длинном шестиэлектродном дефлектронах, поля которых задаются формулами (3)–(6). Полученные координаты и углы наклона на выходе из поля сравнивались с результатами расчета

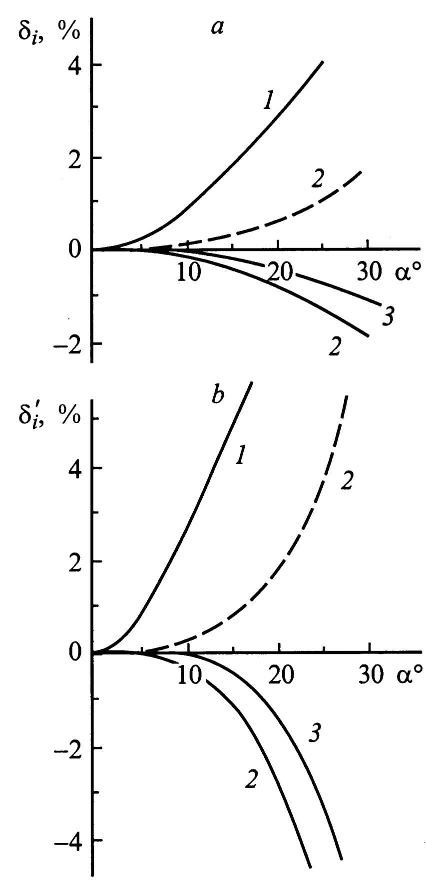

Рис. 5. То же, что на рис. 4, на выходе дефлектронов длиной $l = 4R$.

$l/R = 2$					$l/R = 4$			
V/Φ_0	α_x^0	x_i/R	α_y^0	y_i/R	α_x^0	x_i/R	α_y^0	y_1/R
0.05	3.5	0.192	3.5	0.192	5.9	0.225	5.9	0.225
0.1	7.0	0.386	7.0	0.386	11.6	0.449	11.8	0.450
0.2	14.1	0.779	14.3	0.782	21.7	0.891	23.1	0.907
0.25					26.2	1.100	28.8	1.140
0.3	21.2	1.183	21.8	1.202				
0.4	26.8	1.577	28.0	1.627				
0.5	30.5	1.918	32.4	2.004				
0.6	32.8	2.196	35.0	2.320				
0.8	35.5	2.630	38.4	2.840				
1.0	37.1	2.972	41.1	3.330				

по прямоугольной модели с эффективными длинами в соответствии с формулами (7), (8). Сравнение показало, что для коротких дефлектронов отличие доходило до 100%, а для длинных — не превышало 10%. Это означает, что влияние формы краевого поля на параметры пучка уменьшается с ростом длины дефлектронов и определяющим становится изменение радиального поля.

По результатам расчета параметров осевой траектории определялась нелинейность отклонения по координате (δ_i) и по углу наклона (δ'_i) на выходе из поля по следующим формулам

$$\delta_i = r_i/r_{ih} - 1; \quad \delta'_i = r'_i/r'_{ih} - 1, \tag{9}$$

где r_i, r'_i — расстояние от оси и угол наклона осевой траектории пучка на выходе из поля; r_{ih} и r'_{ih} — эти параметры для однородного поля.

Тогда нелинейность отклонения на объекте равна

$$\Delta = \delta'_i + \delta'_i \lambda, \quad \Delta' = \delta'_i, \tag{10}$$

где λ — расстояние от выхода из поля до объекта.

На рис. 4 представлены величины нелинейности отклонения по координате (a) и углу (b) для короткого шестиэлектродного дефлектрона, длина которого равна диаметру его апертуры (кривые *2*). На рис. 5 — те же параметры для дефлектрона с длиной, равной двум диаметрам апертуры, рассчитанные по прямоугольной модели поля. Связь между силой отклоняющей системы и величиной угла отклонения, а также координатой осевой траектории на выходе из поля приведена в таблице. Сила отклоняющей системы определяется отношением основных питающих напряжений на электродах ($\pm V$) к ускоряющему потенциалу (Φ_0), причем $V_y = V$, $V_x = \sqrt{3}/2V$.

Ход кривых нелинейности отклонения для длинного и короткого дефлектронов, как это видно из рис. 4 и 5, существенно различается. Для первого характер зависимости от угла отклонения соответствует зависимости неоднородности поля бесконечно длинного дефлектора по мере удаления от его продольной оси, которая в первую очередь определяет нелинейность отклонения, а краевое поле не оказывает большого влияния. Для второго существенно влияние краев. При этом величина нелинейности отклонения длинного дефлектора в 2–4 раза меньше, чем короткого, при углах отклонения до 25°.

Следует отметить, что если угол отклонения в коротком дефлектроне превышает 25–30°, то нелинейность отклонения резко меняется и, следовательно, искажается форма пятна из-за сильного различия хода осевой и крайних траекторий пучка. Поэтому такие режимы нецелесообразно использовать в точных приборах, таких как, например, растровый электронный микроскоп.

Для сравнения на рис. 4, 5 приведены параметры четырех- (кривые *1*) и восьмиэлекродных (кривые *3*) дефлекторов, рассчитанные также по программе DEF при одинаковом с шестиэлектродным дефлектроном распределении поля вдоль продольной оси. Как и следовало ожидать, нелинейность отклонения четырехэлектродной системы является наибольшей. Если принять, к примеру, $\delta = 1\%$, то угол отклонения в ней не должен превышать 5°. При этом в коротком шести- и восьмиэлектродных дефлектронах пучок можно отклонять на угол до 8°, в длинном восьмиэлектродном — до 18°, а в шестиэлектродном — до 15°.

Таким образом, предложенный шестиэлектродный дефлектрон со скорректированными третьими гармониками в разложении потенциала в целом ряде случаев оказывается предпочтительнее, поскольку его параметры близки к восьмиэлектродному, а конструктивно он проще.

Список литературы

[1] *Бонштедт Б.Э.* А.С. № 143479. БИ. 1961. № 24.

[2] *Kelly J.* Adv. in Electr.&Electron. Phys. 1977. Vol. 43. P. 116–130.

[3] *Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 7. С. 1348.

[4] *Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я.* А.С. № 1365179. БИ. 1988. № 1.

[5] *Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я., Мосеев В.В.* А.С. № 1557603. БИ. 1990. № 14. 233 с.

[6] *Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1176.

[7] *Фишкова Т.Я., Шапоренко А.А., Овсянникова Л.П.* и др. А.С. № 1729247. БИ. 1993. № 23. 130 с.

[8] *Овсянникова Л.П., Пасовец С.В., Фишкова Т.Я.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 12. С. 171.