

01;10;12

## Изофокусирующая двумерная линза для пучка с конечным эмиттансом

© Е.В. Шпак

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 16 июня 1997 г.)

Исследуется двумерная линза, состоящая из трех пар пластин. Приводятся выражения для увеличения линзы при преобразовании кроссовера в кроссовер. Найдены изофокусирующие режимы работы этой линзы, при которых сохраняется неизменным положение кроссовера при изменении энергии пучка. На примере одной из конфигураций линзы подробно изучено влияние угловых и линейных размеров пучка на положение кроссовера.

В работах [1–3] была подробно изучена изофокусирующая осесимметричная линза, состоящая из трех диафрагм или трех цилиндров, предназначенная для формирования пучка с конечным эмиттансом. Двумерные линзы широко применяются в масс-спектрометрах, в анализаторах скоростей и ряде других приборов. Изофокусирующая двумерная трехэлектродная линза обеспечивает сохранение неизменным положение формируемого кроссовера при изменении энергии пучка. Результаты аналогичных расчетов для пучков с нулевым эмиттансом приведены в монографии [4], однако для пучков с конечным эмиттансом таких расчетов сделано не было.

В данной работе исследуется двумерная линза, состоящая из трех пар пластин, вытянутых вдоль оси  $u$ . Линза схематически представлена на рис. 1. Расстояние между каждой парой пластин равно  $H$ , расстояния между парами —  $0.1H$ . Длина центрального электрода  $A = 0.5H$ . Изменением отношения потенциалов на третьей и первой паре электродов  $V_3/V_1$  обеспечивается изменение энергии частиц в пучке. Изменением отношения потенциалов на второй и первой паре электродов  $V_2/V_1$  подбираются режимы, в которых изменение  $V_3/V_1$  не приводит к смещению формируемого линзой кроссовера. Реперная плоскость, от которой отсчитываются расстояния до кроссоверов на входе и выходе, совмещена с центром линзы ( $z = 0$ , рис. 1).

Наиболее распространенные на практике граничные фазовые контуры на входе в систему хорошо аппроксимируются выражениями

$$\left(\frac{x_0}{X_0}\right)^k + \left(\frac{x'_0}{X'_0}\right)^k = 1, \quad \left(\frac{y_0}{Y_0}\right)^k + \left(\frac{y'_0}{Y'_0}\right)^k = 1, \quad (1)$$

где  $k = 2m/(2n - 1)$ ;  $m$  и  $n$  — целые числа;  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $X'_0$ ,  $Y'_0$  — максимальные значения  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $x'_0$ ,  $y'_0$  соответственно; при  $k = 2$  граничные фазовые контуры являются эллипсами.

В электростатической двумерной линзе нет составляющей силы, действующей на заряженные частицы вдоль оси  $u$ . Поэтому имеет смысл нахождение формируемого системой кроссовера только в направлении

оси  $x$ . Для контуров вида (1) кроссовер параaxиального пучка совпадает с минимумом проекции огибающей на плоскость  $xz$ . Выражение, описывающее преобразование кроссовера в кроссовер, было получено в [5]

$$\frac{f_{2x}}{q_x} + \frac{f_{1x}}{p_x + B} = 1, \quad (2)$$

где  $B = w^k(p_x - f_{1x})^{(1-k)}$ ,  $w = X_0/X'_0$ ,  $f_{1x}$  и  $f_{2x}$  — фокусные расстояния пространства объектов и изображения соответственно,  $p_x$  — расстояние от кроссовера на входе до главной плоскости в пространстве объектов,  $q_x$  — расстояние от выходного кроссовера до главной плоскости в пространстве изображений.

Подставив величины  $p_x = P_x - F_{1x} + f_{1x}$  и  $q_x = Q_x - F_{2x} + f_{2x}$  в выражение (2), получим

$$f_{1x}f_{2x} = (P_x + B - F_{1x})(Q_x - F_{2x}), \quad (3)$$

где  $B = w^k(P_x - F_{1x})^{1-k}$ ,  $P_x > F_{1x}$ ,  $Q_x > F_{2x}$ ,  $F_{1x}$  и  $F_{2x}$  — расстояние от реперной плоскости до фокусов пространства объектов и изображений соответственно,  $P_x$  — расстояние от кроссовера на входе до центра линзы,  $Q_x$  — расстояние от кроссовера на выходе до той же плоскости.

Используя значения кардинальных элементов трехэлектродной двумерной линзы, приведенных в [4], были рассчитаны зависимости потенциалов на электродах линзы, обеспечивающих выполнение равенства (3) для заданных  $P_x$ ,  $Q_x$  и  $w$ . На рис. 2 приведены зависимости отношений потенциалов  $V_2/V_1$  от отношений  $V_3/V_1$  для

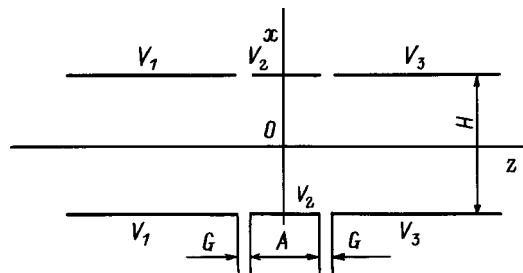
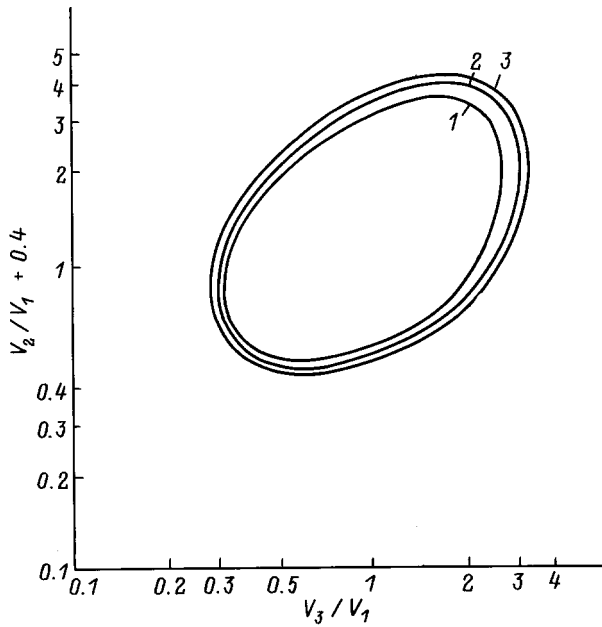
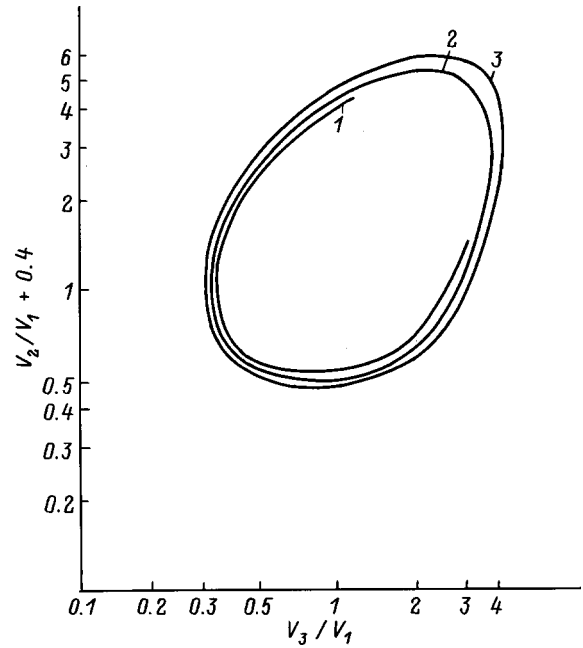


Рис. 1. Двумерная трехэлектродная линза.



**Рис. 2.** Зависимости отношений потенциалов на электродах линзы для  $P_x = Q_x = 6H$ ;  $w = 0.1$  (1), 1 (2), 2 (3).



**Рис. 3.** Зависимости отношений потенциалов для  $P_x = 4H$ ;  $Q_x = 6H$ ;  $w = 0.1$  (1), 0.6 (2), 1 (3).

различных значений параметра  $w$  при  $P_x = Q_x = 6H$  и  $k = 2$ . Кривая 1 с  $w = 0.3$  практически совпадает с соответствующей кривой с нулевым эмиттансом. С увеличением параметра  $w$ , т. е. с увеличением линейного размера пучка в кроссовере на входе  $X_0$  или уменьшением начального разброса углов  $X'_0$ , верхняя ветвь кривой смещается вниз, а нижняя — вверх, так что кривые находятся внутри кривой 1. С увеличением  $w$  этот эффект возрастает.

На рис. 3 приведены зависимости отношений потенциалов  $V_2/V_1$  от  $V_3/V_1$  при расстояниях от входного и выходного кроссоверов до реперной плоскости, равных  $P_x = 4H$ ,  $Q_x = 6H$  и  $k = 2$ . Этот случай соответствует большим значениям увеличения линзы. Отличие кривых, характеризующих преобразование кроссовера в кроссовер, от кривых с нулевым эмиттансом начинает сказываться при меньших значениях параметра  $w$ . Кривая 1, рассчитанная при  $w = 0.1$ , практически совпадает с соответствующей кривой для пучка с нулевым эмиттансом. Кривая 2 соответствует  $w = 0.6$  и уже заметно отличается от кривой 1. Она является замкнутой и находится внутри области, ограниченной кривой 1. С дальнейшим увеличением  $w$  сохраняется только нижняя часть кривой. Кривая 3 рассчитана для  $w = 1$ . Верхняя часть кривой 1 отличается от нижней тем, что для каждого заданного  $V_3/V_1$  при больших значениях  $V_2/V_1$  главная и фокальная плоскости пространства объектов смещены ближе к предмету. С увеличением  $w$  формируемый кроссовер сдвигается от положения изображения при  $w = 0$  к фокальной плоскости линзы. Для того чтобы его положение осталось неизменным, нужно уменьшать силу линзы. При этом положение фокальной плоскости

$F_{1x}$  приближается к кроссоверу на входе быстрее для режимов, соответствующих верхней части кривой. При  $F_{1x} \geq P_x$  линза кроссовера не формирует. При увеличении  $w \leq 1$  для заданного значения  $P_x = 4H$  сформировать кроссовер на расстоянии  $Q_x = 6H$  от центра линзы невозможно.

Выражение для увеличения линзы при преобразовании кроссовера в кроссовер получено в работе [5]

$$M_x = \left\{ \left[ X'_0 p_x \left( 1 - \frac{q_x}{g_x} \right)^k \right] + \left[ X_0 \left( 1 - \frac{q_x}{f_{2x}} \right) \right]^k \right\}^{1/k} X'_0{}^{-1}, \quad (4)$$

где  $q_x$  и  $g_x$  — расстояния от главной плоскости пространства изображений до формируемого кроссовера и изображения соответственно,  $p_x$  — расстояние от входного кроссовера до главной плоскости пространства объектов.

Выражение (4) можно несколько упростить

$$M_x = \left[ p_x^k \left( 1 - \frac{q_x}{g_x} \right)^k + w^k \left( 1 - \frac{q_x}{f_{2x}} \right)^k \right]^{1/k}. \quad (5)$$

Запишем выражения для увеличения в зависимости от параметров  $P_x$ ,  $Q_x$ ,  $F_{1x}$  и  $F_{2x}$ , отсчитываемых от реперной плоскости. Подставив величины  $p_x = P_x - F_{1x} + f_{1x}$ ;  $q_x = Q_x - F_{1x} + f_{2x}$  и используя выражение (2) и уравнение Ньютона, связывающее фокусные расстояния  $f_{1x}$  и  $f_{2x}$  с положением источника и изображения, получим

$$M_x = (Q_x - F_{2x})(B^k + w^k)^{1/k} / f_{2x}. \quad (6)$$

При этом мы предполагали, что входной кроссовер совмещен с положением предмета.

Для сравнения с эллиптическими фазовыми контурами в одном режиме были рассчитаны потенциалы на электродах при  $k = 4$  для нижней ветви кривой. При равных плечах  $P_x = Q_x = 6H$ ,  $w = 1$  и  $V_3/V_1 = 2$  значение  $V_2/V_1$  и  $M_x$  изменялись незначительно и были равны  $V_2/V_1 = 0.312$ ,  $M_x = 0.938$  (при  $k = 2$   $V_2/V_1 = 0.361$  и  $M_x = 1.14$ ).

На основании проведенных расчетов и сравнения их с результатами работ [1–3] можно сделать следующие выводы. Как для двумерной линзы, так и для трехэлектродной осесимметричной линзы зависимости потенциалов на электродах при изменении параметра  $w = X_0/X'_0$  ведут себя схожим образом. При уменьшении  $w$  они приближаются к тем же зависимостям для пучка с нулевым эмиттансом. С увеличением  $w$  кривые смещаются таким образом, что оказываются внутри тех же кривых при меньших значениях  $w$ . С дальнейшим увеличением  $w$  кривые становятся разомкнутыми, причем сначала исчезает верхняя часть. Возрастание эмиттанса за счет увеличения разброса углов и увеличения размеров пучка сказываются на изменении хода кривых противоположным образом. Влияние увеличения размера пучка (или уменьшения угловых размеров) сказывается тем сильнее, чем больше выходное плечо  $G_x$  относительно входного  $P_x$ .

Представляет интерес рассчитать зависимости потенциалов на электродах двумерной линзы, обеспечивающие не только сохранение положения формируемого кроссовера, но и постоянного увеличения. Для этого нужны не менее четырех электродов. Для таких систем даже для пучка с нулевым эмиттансом имеется крайне мало данных, а для пучков с конечным эмиттансом такого рода расчетов вообще проведено не было.

## Список литературы

- [1] Шпак Е.В. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 1. С. 162–165.
- [2] Шпак Е.В., Смирнова А.А. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 3. С. 109–113.
- [3] Shpak E.V. // Nucl. Instr. and Meth. 1995. Vol. A363. P. 64–66.
- [4] Harting E., Read F.H. Electrostatic Lenses. Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier Sci. Publish. Company, 1976. 322 p.
- [5] Shpak E.V., Yavor S.Ya. // Nucl. Instr. and Meth. 1985. Vol. A239. P. 288–293.