

- [1] Бутурлин А.И., Габузин Т.А., Голованов И.А. Газочувствительные датчики на основе металлоксидных полупроводников. М.: ЦНИИ "Электроника", 1988. 40 с.
- [2] Кулаков В.И., Ладыгин В.А., Шаговец В.И. и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Сов. радио, 1980. 225 с.
- [3] Макаров В.О., Сейковский М.Д., Тонкошкур А.С., Черненко И.М. // Изв. вузов. Физика. 1983. № 6. С. 3-6.
- [4] Мясников И.А., Сутарев В.А., Куприянов Л.Ю., Замялов С.А. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях. М.: Наука, 1991. 327 с.
- [5] Тонкошкур А.С., Макаров В.О., Черненко И.М. // УФЖ. 1988. Т. 33. № 11. С. 1710-1711.
- [6] Тонкошкур А.С., Черненко И.М. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 8. С. 188-190.

## ИЗОФОКУСИРУЮЩАЯ ЛИНЗА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С КОНЕЧНЫМ ЭМИТТАНСОМ

*Е.В.Шпак, А.А.Смирнова*

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН,  
194021, Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 4 мая 1994 г.)

В работе [1] была исследована изофокусирующая линза, состоящая из трех диафрагм, предназначенная для формирования пучка с конечным эмиттансом. Линза обеспечивает сохранение неизменным положения формируемого ею кроссовера при изменении энергии пучка. Осесимметричные линзы из цилиндрических электродов широко используются в электронных и ионных приборах и установках. Поэтому актуальной является задача нахождения соотношений между потенциалами на цилиндрических электродах, при которых с изменением энергии положение формируемого линзой кроссовера пучка не изменялось. Результаты аналогичных расчетов для пучков с нулевым эмиттансом приведены в монографии [2]. В ней даны зависимости потенциалов на электродах, обеспечивающих сохранение положения изображения при изменении энергии пучка.

В данной работе исследуется осесимметричная линза, состоящая из трех цилиндрических электродов, схематически представленная на рис. 1. Диаметры всех цилиндров равны  $D$ , расстояния между цилиндрами  $0.1D$ . Длина центрального цилиндра равна  $A = D$ . Изменением отношения потенциалов на третьем и первом электродах  $V_3/V_1$  обеспечивается изменение энергии частиц в пучке. Изменением отношения потенциалов на втором и первом электродах  $V_2/V_1$  подбираются режимы, в которых изменение  $V_3/V_1$  не приводит к смещению формируемого линзой кроссовера. Реперная плоскость, от которой отсчитываются

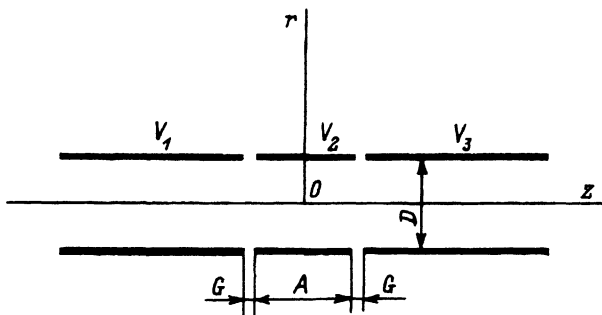


Рис. 1. Трехэлектродная линза.

расстояния до кроссоверов на входе и выходе, совмещена с центром линзы ( $z = 0$ , рис. 1).

Рассматривался случай, когда начальные значения координат и углов наклона в кроссвере на входе ограничены фазовыми контурами вида

$$\left(\frac{r_0}{R_0}\right)^k + \left(\frac{r'_0}{R'_0}\right)^k = 1, \quad (1)$$

где  $R_0$  и  $R'_0$  — максимальные величины начальных значений  $r_0$  и  $r'_0$  соответственно,  $k = 2m/(2n-1)$ ,  $m$  и  $n$  — целые числа; при  $k = 2$  граничные фазовые контуры являются эллипсами.

Выражение, характеризующее преобразование кроссовера в кроссовер, в этом случае получено в работе [3]

$$f_1 f_2 = (P + B - F_1)(Q - F_2), \quad (2)$$

где  $B = \omega^k(P - F_1)^{1-k}$ ,  $\omega = R_0/R'_0$ ,  $P > F_1$ ,  $Q > F_2$ ,  $f_1$  и  $f_2$  — фокусные расстояния в пространстве объектов и изображений,  $F_1$  и  $F_2$  — расстояния от реперной плоскости до фокусов пространства объектов и изображений соответственно,  $P$  — расстояние от кроссовера на входе до центра линзы,  $Q$  — расстояние от кроссовера на выходе до той же плоскости.

Для контуров вида (1) кроссовер парааксиального пучка совпадает с минимумом его огибающей.

Используя значения кардинальных элементов трехэлектродной линзы, приведенных в [2], мы рассчитали зависимости потенциалов на электродах линзы, обеспечивающих выполнение равенства (2) для заданных  $P$ ,  $Q$  и  $\omega$ . На рис. 2 приведены зависимости отношений потенциалов  $V_2/V_1$  от отношения  $V_3/V_1$  для различных значений параметра  $\omega$  при  $P = Q = 6$  и  $k = 2$ . Все линейные размеры отнесены к диаметру электродов линзы  $D$ . Кривая 1 с  $\omega = 0.3$  практически совпадает с кривой, обеспечивающей сохранение постоянным положения изображения при заданном положении объекта, т.е. соответствующей кривой при нулевом эмиттансе. С увеличением параметра  $\omega$ , т.е. с увеличением линейного размера пучка в кроссвере на входе  $R_0$  или уменьшением начального разброса углов  $R'_0$ , верхняя ветвь кривой смещается вниз, а нижняя вверх, так что кривые находятся внутри кривой 1. С увеличением  $\omega$  этот эффект возрастает (кривая 2, 3).

Иногда при приближении кроссовера к фокальной плоскости уравнение (2) имеет одно или два дополнительных решения. Например, при

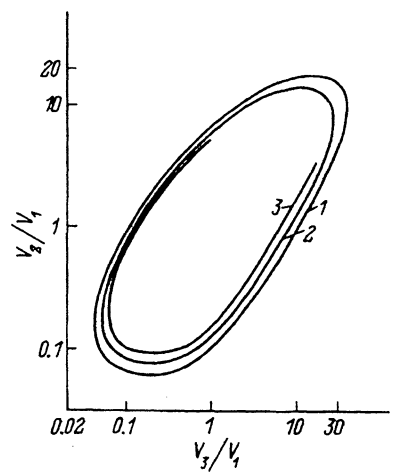
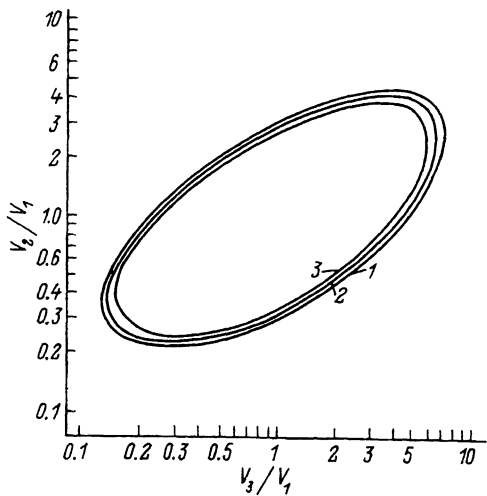


Рис. 2. Зависимости отношений потенциалов на электродах линзы для различных значений  $\omega$  ( $P = Q = 6$ ).

Рис. 3. Потенциалы на электродах линзы при  $P = 2, Q = 4$ .

$\omega = 1$  и  $V_3/V_1 = 2$  помимо решений  $V_2/V_1 = 0.46$  и  $3.9$  (рис. 2) имеется решение  $V_2/V_1 = 2.9$ . В последнем случае  $f_1 = 4.60, f_2 = 6.40, F_1 = 5.963, F_2 = 4.90$  и огибающая пучка за линзой практически параллельна оси  $z$ , что связано с близостью входного кроссовера к фокальной плоскости пространства объектов  $F_1$ .

Выражение для увеличения линзы при преобразовании кроссовера в кроссовер получено в работе [4]

$$M = \left\{ \left[ R'_0 p \left( 1 - \frac{q}{g} \right) \right]^k + \left[ R_0 \left( 1 - \frac{q}{f_2} \right) \right]^k \right\}^{1/k} R'^{-1}_0, \quad (3)$$

где  $q$  и  $g$  — расстояния от главной плоскости пространства изображений до формируемого кроссовера и изображения соответственно,  $p$  — расстояние от входного кроссовера до главной плоскости пространства объектов.

Выражение (3) можно несколько упростить

$$M = \left[ p^k \left( 1 - \frac{q}{g} \right)^k + \omega^k \left( 1 - \frac{q}{f_2} \right)^k \right]^{1/k}. \quad (4)$$

Запишем выражение для увеличения в зависимости от параметров  $P, Q, F_1$  и  $F_2$ , отсчитываемых от реперной плоскости. Подставив величины  $p = P - F_1 + f_1, q = Q - F_1 + f_2$  и используя уравнение Ньютона, связывающее фокусные расстояния  $f_1$  и  $f_2$  с положением источника и изображения и выражения (2), получим

$$M = \frac{Q - F_2}{f_2} \left( B^k + \omega^k \right)^{1/k}. \quad (5)$$

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

Для указанного выше решения уравнения (2) при  $V_3/V_1 = 2$ ,  $V_2/V_1 = 2.9$  увеличение велико —  $M = 4.7$ , в то время как два решения ( $V_2/V_1 = 0.46$  и  $3.9$ ) соответствуют формированию кроссовера с увеличением  $M < 1$ . При приближении входного кроссовера к фокальной плоскости пространства предметов пучок на выходе всегда имеет значительный размер, а его огибающая не имеет явно выраженного минимума. Поэтому эти дополнительные решения уравнения (2) не представляют практического интереса и в дальнейшем нами не рассматривались.

На рис. 3 даны зависимости отношений потенциалов  $V_2/V_1$  от  $V_3/V_1$  при расстояниях от входного и выходного кроссоверов до реперной плоскости, равных  $P = 2$ ,  $Q = 4$  и  $k = 2$ . Этот случай соответствует большим значениям увеличения линзы. Отличие кривых, характеризующих преобразование кроссовера в кроссовер, от кривых, характеризующих преобразование предмета в изображение, начинает сказываться при меньших значениях параметра  $\omega$ . Кривая 1, рассчитанная при  $\omega = 0.1$ , практически совпадает с соответствующей кривой для пучка с нулевым эмиттансом. Кривая 2 соответствует  $\omega = 0.2$  и уже заметно отличается от кривой 1. Она является замкнутой и находится внутри области, ограниченной кривой 1. С дальнейшим увеличением  $\omega$  сохраняется только нижняя часть кривой. Кривая 3 рассчитана для  $\omega = 0.4$ . 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  $\omega$  формируемый линзой кроссовер сдвигается от положения изображения при  $\omega = 0$  к фокальной плоскости линзы. Для того чтобы его положение осталось неизменным, нужно уменьшать силу линзы. При этом положение фокальной плоскости  $F_1$  приближается к кроссоверу на входе быстрее для режимов, соответствующих верхней части кривой. При  $F_1 \geq P$  линза кроссовера не формирует. При увеличении  $\omega \leq 1$  для заданного значения  $P = 2$  сформировать кроссовер на расстоянии  $Q = 4$  от центра линзы невозможно.

Для сравнения с эллиптическими фазовыми контурами в одном режиме были рассчитаны потенциалы на электродах для фазовых контуров с  $k = 4/3$  и 4. При равных плечах  $P = Q = 6$ ,  $\omega = 1$  и  $V_3/V_1 = 2$  значения  $V_2/V_1$  изменились незначительно и были равны 0.45 и 0.47 при  $k = 4$  и  $4/3$  соответственно (для  $k = 2$   $V_2/V_1 = 0.46$ ).

На основании проведенных расчетов и сравнения их с результатами работы [1] можно сделать следующие выводы. Как для линзы с цилиндрическими электродами, так и для линзы, образованной системой диафрагм, зависимости потенциалов на электродах при изменении параметра  $\omega = R_0/R'_0$  ведут себя схожим образом. При уменьшении  $\omega$  они приближаются к тем же зависимостям для пучка с нулевым эмиттансом, при которых неизменными поддерживаются положения предмета и изображения. С увеличением  $\omega$  кривые смещаются таким образом, что оказываются внутри тех же кривых при меньших значениях  $\omega$ . С дальнейшим увеличением  $\omega$  кривые становятся разомкнутыми, причем сначала исчезает их верхняя часть. Возрастание эмиттанса пучка за счет увеличения разброса углов  $R'_0$  и возрастания размера

пучка  $R_0$  сказываются на изменении хода кривых противоположным образом. Влияние увеличения линейного размера пучка (или уменьшения его угловых размеров) сказывается тем сильнее, чем больше выходное плечо  $Q$  относительно входного  $P$ .

В дальнейшем представляет интерес рассчитать зависимости потенциалов на электродах линзы, обеспечивающие не только сохранение положения формируемого кроссовера, но и постоянного увеличения. Для этого количество электродов должно быть не менее четырех. 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] Шнак Е.В. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 1. С. 162-165.
- [2] Harting E., Read F.H. *Electrostatic Lenses*. Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier Sci. Publish. Company, 1976. 322 p.
- [3] Фишкова Т.Я., Шнак Е.В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 4. С. 817-820.
- [4] Шнак Е.В., Явор С.Я. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 8. С. 1610-1614.

10

Журнал технической физики, т. 65, в. 3, 1995

© 1995 г.

## ПЛОСКИЙ ЗЕРКАЛЬНЫЙ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОР С ТОРЦЕВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

*Л.П.Овсянникова, Т.Я.Фишкова*

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 31 мая 1994 г.)

Плоский конденсатор — наиболее простое по конструкции устройство, что является одной из причин его широкого использования для энергоанализа пучков заряженных частиц. Особенно он удобен при работе в режиме спектрографа. Свойства плоского зеркального анализатора с однородным полем (ПЗА) хорошо изучены [1]. Однако выражения для абберрационного коэффициента второго порядка  $C_2$ , величины удельной дисперсии  $\delta$ , оптимальных значений угла раствора пучка  $\alpha_{opt}$  и размера входной щели  $s_{1opt}$  в этой работе ошибочны. На самом деле они имеют вид

$$C_2 = \frac{2L_0(1 - 4 \sin^2 \theta_0)}{\sin^2 2\theta_0}, \quad \delta = \frac{\sin^2 \theta_0}{|1 - 4 \sin^2 \theta_0| \alpha^2}, \quad (1), (2)$$

$$\alpha_{opt} = \frac{\sin \theta_0}{\sqrt{R|1 - 4 \sin^2 \theta_0|}}, \quad S_{1opt} = \frac{L_0}{6R \cos^2 \theta_0}, \quad (3), (4)$$