

Краткие сообщения

10

Электронно-оптические характеристики комбинированной электростатической линзы

© Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: fishkova@mail.ru

(Поступило в Редакцию 27 апреля 2010 г.)

Рассчитаны нагрузочные характеристики электростатической линзы, состоящей из трех коаксиальных цилиндров, которая фокусирует в одной точке как приосевые, так и удаленные от оси кольцевые пучки. Такая комбинированная линза позволяет примерно на порядок увеличить интенсивность пучка заряженных частиц по сравнению с широко применяемой одиночной осесимметричной линзой.

Введение

В настоящей работе продолжен расчет параметров ранее предложенной автором комбинированной линзы (КЛ) [1]. Она состоит из трех коаксиальных цилиндров, которые образуют совмещенные в пространстве коаксиальную цилиндрическую линзу (КЦЛ) [2] и одиночную осесимметричную линзу (ОЛ). Такая комбинированная линза способна фокусировать в одной точке сплошные приосевые и удаленные от оси кольцевые пучки заряженных частиц, что способствует повышению светосилы различных устройств. Следует отметить, что одиночная ОЛ предлагаемой системы имеет более простую конструкцию, поскольку состоит не из трех последовательно расположенных цилиндрических электродов одинакового диаметра, как принято обычно, а из двух коаксиальных цилиндров. В работе [1] проведен численный расчет фокусных расстояний КЛ при впуске пучка заряженных частиц параллельно оптической оси системы. Однако этого недостаточно для широкого использования предложенной КЛ, так как в большинстве приборов источник заряженных частиц расположен не в бесконечности, а в определенном месте.

Численные расчеты

Целью настоящей работы является расчет нагрузочных характеристик комбинированной электростатической линзы (определение положения изображения в зависимости от положения объекта). Устройство линзы с ходом траекторий заряженных частиц схематически представлено на рис. 1, *a*. Распределение потенциала в такой линзе дано на рис. 1, *b*. Система имеет вращательную симметрию относительно своей продольной оси z . Внешний цилиндрический электрод радиуса R с тормозящим заряженные частицы потенциалом V и средний заземленный цилиндрический электрод радиуса ρ совместно с плоским торцевым также зазем-

ленным электродом образуют КЦЛ длиной L , которая осуществляет фокусировку кольцевых пучков удаленных от продольной оси системы. Одновременно внутренних цилиндрический электрод радиуса R_0 длиной l_0 с потенциалом U совместно со средним заземленным электродом образуют одиночную ОЛ, которая фокусирует сплошные приосевые пучки. Силы КЦЛ и ОЛ подбираются таким образом, чтобы точки фокусировки обеих линз находились в одном и том же месте. Следует отметить, что поскольку поля КЦЛ и ОЛ не перекрываются (см. рис. 1, *b*), они действуют независимо. Это обстоятельство является существенным преимуществом исследуемой линзы, так как поля большинства комбинированных систем обычно влияют друг на друга.

Расчеты полей и фокусирующих свойств комбинированной линзы проведены численно по той же программе для электростатических систем с вращательной симметрией, что в предыдущей работе автора [1], и при тех же геометрических параметрах. Составляющие комбинированной линзы являются компактными устройствами: КЦЛ состоит из двух цилиндров внешнего и среднего с соотношением радиусов $R/\rho = 4$ длиной $L = R$, ОЛ состоит также из двух цилиндров среднего и внутреннего с соотношением радиусов $\rho/R_0 = 1.25$ длиной $l_0 = 2R_0$ и расположена посередине КЦЛ. Данная геометрия обусловлена тем, что при уменьшении радиуса среднего цилиндра возникают трудности с размещением третьего цилиндрического электрода наименьшего радиуса.

Для указанных размеров комбинированной линзы в широком диапазоне изменения положения источника заряженных частиц $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$ для различной величины силы КЦЛ $F_c = eV/\varepsilon_0$ (e и ε_0 — заряд и начальная энергия заряженных частиц) вычислялись положения точек фокусировки на оси линзы кольцевого пучка g . Затем для тех же самых положений источника определялись силы ОЛ $F_0 = eU/\varepsilon_0$, при которых приосевой пучок фокусируется на оси на том же расстоянии g , что и кольцевой пучок (потенциалы V и U см. на

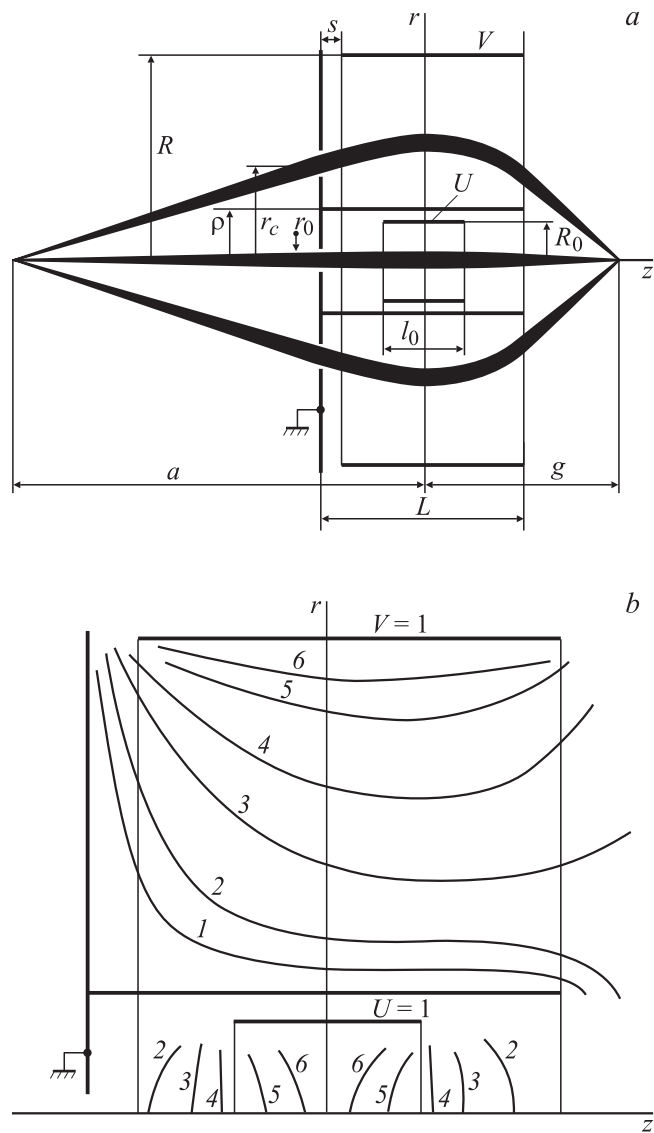


Рис. 1. Трехэлектродная комбинированная линза с ходом траекторий пучка заряженных частиц (а) и картина эквипотенциалов φ в такой линзе (b). φ/V (φ/U): 1 — 0.1, 2 — 0.2, 3 — 0.4, 4 — 0.6, 5 — 0.8, 6 — 0.9.

рис. 1, а). Величины a и g отсчитываются от середины линзы. Эти и все другие линейные параметры КЛ выражены в единицах радиуса R внешнего электрода, что позволяет изменение геометрии комбинированной линзы по подобию — при варьировании ее габаритного размера. Минимально возможная величина расстояния от источника до центра линзы a_{\min} обусловлена тем, что точка фокусировки КЦЛ для кольцевых пучков при $a < a_{\min}$ смещается с продольной оси системы по радиусу и тем больше, чем меньше a . Максимально возможная величина a_{\max} связана с тем обстоятельством, что при $a > a_{\max}$ кольцевой пучок садится на средний электрод системы. Эта величина тем больше, чем меньше сила КЦЛ.

На рис. 2,3 приведены параметры исследованной комбинированной линзы в зависимости от положения источника заряженных частиц в широком диапазоне изменения силы коаксиальной цилиндрической линзы и соответствующая сила осесимметричной составляющей, обеспечивающие фокусировку пучка точка на продольной оси системы. Из рис. 2 видно, что при удалении источника заряженных частиц от линзы, как это обычно бывает, точка фокусировки пучка приближается к ней. С ростом силы КЦЛ растет и сила ОЛ, в то время как последняя при одинаковой силе КЦЛ слабо зависит от положения источника.

На рис. 3 показан радиус входа криволинейной центральной траектории пучка r_c , вокруг которой осуще-

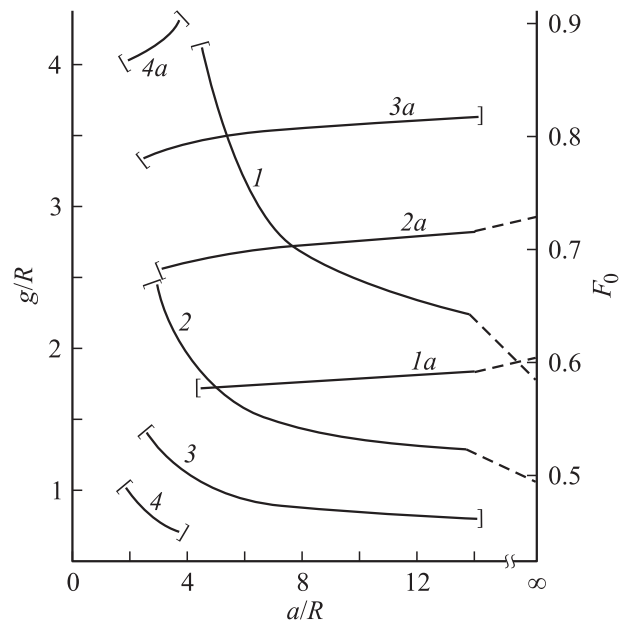


Рис. 2. Положение изображения в комбинированной линзе g/R (кривые 1–4) и сила осесимметричной составляющей $F_0 = eU/\epsilon_0$ (кривые 1а–4а) в зависимости от положения источника заряженных частиц при различной силе КЦЛ $F_c = eV/\epsilon_0$: 1, 1а — 0.5; 2, 2а — 0.7; 3, 3а — 0.9; 4, 4а — 1.1.

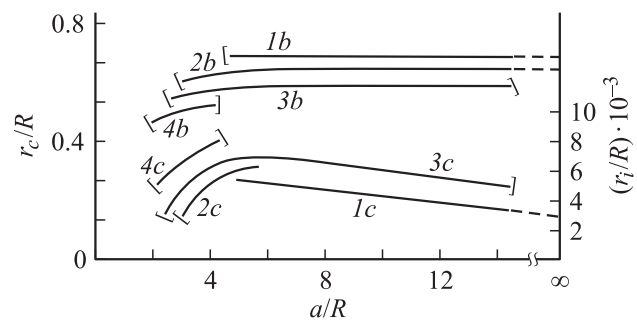


Рис. 3. Радиус входа центральной траектории кольцевого пучка r_c/R (кривые 1b–4b), а также радиус сфокусированного на оси пучка r_i/R (кривые 1c–4c) в зависимости от положения источника заряженных частиц при тех же силах КЦЛ F_c , что и на рис. 2: 1b, 1c — 0.5; 2b, 2c — 0.7; 3b, 3c — 0.9; 4b, 4c — 1.1.

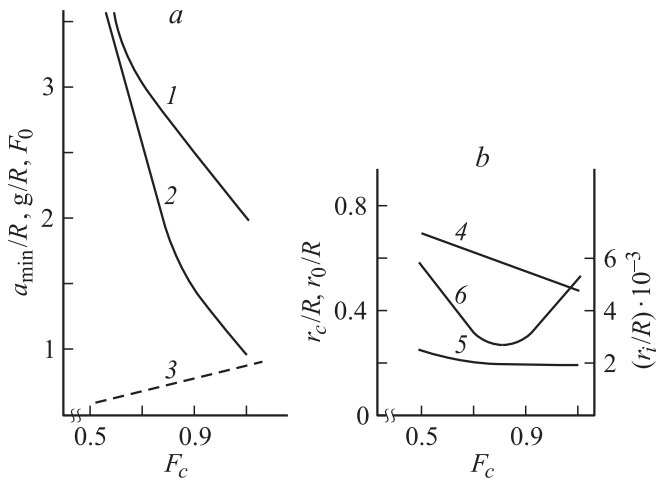


Рис. 4. *a* — минимальные расстояния от источника заряженных частиц до середины комбинированной линзы (КЛ) a_{\min}/R (кривая 1), соответствующие положения сфокусированного на оси пучка g/R , отсчитываемые от середины КЛ (кривая 2), и сила осесимметричной составляющей F_0 (кривая 3) в зависимости от силы КЦЛ F_c . *b* — радиус центральной траектории кольцевого пучка r_c/R (кривая 4), максимальный радиус приосевого пучка r_0/R_0 (кривая 5), а также радиус сфокусированного на оси пучка r_i/R (кривая 6) в зависимости от силы КЦЛ F_c .

ствляется фокусировка кольцевого пучка. Этот радиус при расстояниях от источника до линзы $a > 5R$ практически не меняется. На том же рисунке приведен радиус сфокусированного на оси комбинированной линзы пятна r_i/R при условии, что крайние траектории пучка на входе в КЦЛ находятся от центральной на расстоянии $r_c \pm 0.005R$, т.е. начальная ширина кольцевого пучка равна $\Delta r_c = 0.01R$.

Отметим, что максимальный радиус на входе в ОЛ сплошного приосевого пучка r для различных режимов работы меняется незначительно и составляет $r_0 = 0.2-0.3R_0$. Квадратными скобками на кривых приведенных рисунков с правой стороны отмечены значения параметров, при которых кольцевой пучок садится на средний электрод КЛ. Скобки с левой стороны означают предел, ниже которого становится невозможной фокусировка пучка на оси КЛ. Режимы работы при большой величине a , в том числе $a_{\max} = \infty$ возможны при любой силе комбинированной линзы небольшой величины $F_0 \approx F_c \leq 0.7$. Однако с практической точки зрения наибольший интерес представляет возможность фокусировки пучков, выходящих из близко расположенных к линзе источников. Минимально возможное расстояние a_{\min} существенно зависит от силы комбинированной линзы.

На рис. 4 даны параметры КЛ, обеспечивающие фокусировку с минимально возможным расстоянием от источника до середины линзы, в зависимости от силы КЦЛ F_c , а также соответствующая сила ОЛ F_0 , которая изменяется по линейному закону. На рис. 4, *a* видно,

что с ростом силы F_c минимально возможные расстояния от источника до линзы уменьшаются. При этом становятся меньше также расстояния от линзы до точки фокусировки на оси. Из рис. 4, *b* следует, что меньше становится и радиус входа центральной траектории кольцевого пучка, который с ростом силы убывает по линейному закону (кривая 4). При этом максимальный радиус входа приосевого пучка практически не меняется. Для минимально возможных значений a величина радиуса сфокусированного пятна находится в пределах $r_i = (2.5-6) \cdot 10^{-3}R$ и имеет минимум при практически одинаковых силах КЦЛ и ОЛ вблизи $F_c = 0.8$.

Широкое распространение на практике получили электростатические линзы с осевой симметрией, которые из-за наличия сферической аберрации хорошо фокусируют лишь близкие к оси пучки заряженных частиц, поэтому интенсивность сфокусированного пучка мала. Для компенсации сферической аберрации, как правило, используют сложные в конструктивном отношении многоэлектродные корректирующие системы. В предлагаемой простой по конструкции комбинированной линзе удается существенно повысить интенсивность пучка в точке фокусировки ОЛ за счет фокусировки в той же точке кольцевых пучков. Величины токов сплошного приосевого и кольцевого пучков соответственно равны:

$$i_0 = k_0 j \pi r_0^2, \quad i_c = 2k j \pi r_c (\Delta r_c), \quad (1)$$

где j — плотность тока в источнике, k_0, k — коэффициенты, зависящие от начального угла наклона к продольной оси линзы траектории заряженных частиц.

Выигрыш в интенсивности сфокусированного пучка ξ определяется из соотношения полного тока комбинированной линзы к току ее осесимметричной составляющей

$$\xi = i/i_0 = 1 + \left[2kr_c \frac{\Delta r_c}{k_0 r_0^2} \right]. \quad (2)$$

Для рассчитанных выше режимов работы КЛ значения параметров, входящих в формулу (2) лежат в пределах:

$$r_0 = 0.2-0.3R_0 \quad (R_0 = 0.2R),$$

$$r_c = 0.5-0.7R, \quad \Delta r_c = 0.01R.$$

При равномерном распределении по углу плотности тока ($k_0 = k = 1$) выигрыш в токе равен $\xi_1 = 7.3-8.5$ раз в режимах с a_{\min} и $\xi_2 = 4.3-4.9$ раз — в режимах с $a \geq 5R$. Однако чаще всего плотность тока падает с ростом угла раствора пучка α и, как правило, по косинусoidalному закону, а именно $k = \cos^n \alpha$ при $n = 2, 3$. В случае квадратичной зависимости ($k = \cos^2 \alpha$) $k_0 = 0.999$, а коэффициент k меняется в пределах $k = 0.906-0.981$ в зависимости от положения источника и силы линзы.

Расчеты по формуле (2) показали, что в режимах соответствующих a_{\min} выигрыш в интенсивности пучка составляет $\xi_1 = 6.7-7.8$, а в режимах с $a \geq 5R$ —

$\xi_2 = 4.3-4.8$. По сравнению с равномерным распределением плотности тока по углу выигрыш тока в сфокусированном КЛ пятне уменьшается менее чем на 10%. В случае зависимости плотности тока источника от начального угла выхода частиц по кубическому закону ($k = \cos^3 \alpha$) коэффициент k_0 не меняется по сравнению с квадратичным законом, так как в осесимметричной линзе уменьшается начальный угол раствора пучка, участвующего в формировании сфокусированного пятна. Коэффициент, ответственный за интенсивность кольцевого пучка равен $k = 0.869-0.971$. При этом выигрыш в интенсивности по сравнению с одиночной осесимметричной линзой составляет $\xi_1 = 6.4-7.5$, $\xi_2 = 4.2-4.8$, т.е. уменьшается незначительно по сравнению с квадратичной зависимостью от косинуса плотности тока источника.

Понятно, что увеличение ширины кольцевого пучка приводит к увеличению его интенсивности, однако при этом возрастает размер сфокусированного пятна. Расчеты показали, что при двукратном увеличении размера кольца для большинства режимов работы КЛ радиус пятна в точке фокусировки также возрастает приблизительно в два раза. Однако существуют такие режимы, когда источник расположен вблизи a_{\min} , для которых радиус сфокусированного пятна растет не столь сильно. Так в области изменения силы линзы $0.5 \leq F_c \leq 1.1$ выигрыш в интенсивности при соответствующем a_{\min} составляет 1.7–2.0 раза, но при этом увеличение размера сфокусированного пятна равно 1.3–1.6 раз, т.е. несколько меньше. Например, при ширине кольцевого пучка $\Delta r_c = 0.02R$ в режиме $F_c = 0.9$, $F_0 = 0.783$, $a_{\min} = 2.5R$, начальный радиус центральной траектории кольцевого пучка равен $r_c = 0.55R$, а максимальный радиус выхода приосевого пучка $r_0 = 0.2R$. Для этого режима в случае $k = \cos^2 \alpha$ интенсивность пучка в комбинированной линзе больше, чем в осесимметричной в $\xi_1 = 13$ раз. При ширине кольца $\Delta r_c = 0.01R$ в указанном режиме $\xi_1 = 7.3$, т.е. интенсивность пучка в этом случае меньше в 1.8 раза, но и размер пятна в фокусе также меньше в 1.3 раза.

Заключение

Рассчитаны электронно-оптические характеристики предложенной автором, простой в изготовлении, комбинированной электростатической линзы, состоящей из трех коаксиальных цилиндров. Такая линза способна сфокусировать в одной точке приосевые пучки с помощью осесимметричной линзы и удаленные от оси кольцевые пучки с помощью коаксиальной линзы. В широком диапазоне изменения положения источника заряженных частиц и силы линзы найдено положение сфокусированного пучка на продольной оси линзы. Определен выигрыш в интенсивности такого пучка по сравнению с наиболее часто используемой на практике электростатической одиночной осесимметричной линзой, который оказался равным 4–13 раз.

Список литературы

- [1] Фишкова Т.Я. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 9. С. 31–39.
- [2] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 16. С. 39–44.