

01;10

## Обобщенное возбуждение коаксиальной цилиндрической линзы

© Л.П. Овсянникова, Т.Я. Фишкова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 16 июня 1999 г.

Рассчитаны кардинальные элементы коаксиальной линзы при фокусировке кольцевых пучков на ось линзы. Найдена эмпирическая формула возбуждения линзы, учитывающая ее силу, поперечные и продольные размеры, позволившая получить простые выражения для положения фокуса и начального радиуса осевой траектории пучка.

Электростатическая линза, состоящая из двух коаксиальных цилиндров и плоской диафрагмы, расположенной на входе вблизи цилиндрических электродов, может использоваться для фокусировки полых пучков заряженных частиц на оптическую ось линзы [1]. Такая линза является сильнофокусирующей и может заменить систему квадрупольных линз, причем конструктивно она существенно проще последней.

В предыдущих работах авторов [2] найдено оптимальное положение входной диафрагмы коаксиальной цилиндрической линзы (КЦЛ), а также рассчитаны ее кардинальные элементы и нагрузочные характеристики для различных радиусов цилиндров при длине, не превышающей диаметр внешнего цилиндра. С целью нахождения общего выражения для возбуждения линзы, связывающего ее электрические и геометрические параметры, в настоящей работе рассчитаны КЦЛ с разными длинами и соотношениями радиусов цилиндров.

Расчеты проведены численно на компьютере по программе для электростатических электронно-оптических систем с вращательной симметрией, к которым относится и предложенная авторами модификация КЦЛ. В режимах фокусировки на ось линзы рассчитывались ее кардинальные элементы: фокусное расстояние, положение главной плоскости, а также радиус осевой траектории, вокруг которой осуществляется фокусировка. Соотношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров изменялось в диапазоне  $R/\rho = 10 \div 100$  при оптимальном зазоре между

диафрагмой и внешним цилиндрическим электродом  $s = 0.1R$ . При этом длина линзы увеличивалась до тех пор, пока частицы не попадали на ее внутренний цилиндрический электрод.

На рис. 1, 2 приведены результаты расчета кардинальных элементов КЦЛ. Схематическое изображение линзы, ход осевой траектории и распределение потенциала вдоль нее показаны на рис. 1. Изменяющимся параметром является сила линзы (отношение разности потенциалов между электродами к энергии пучка  $eV/\varepsilon$ ). Скобочками на этих рисунках отмечены значения кардинальных элементов в режимах, когда частицы начинают садиться на внутренний электрод КЦЛ.

Для данной модификации КЦЛ не представляется возможным решить задачу фокусировки пучка аналитически. Поэтому кардинальные элементы КЦЛ определялись нами эмпирическим путем на основании численных расчетов. В работе [2] найдены выражения для фокусного расстояния, положения главной плоскости и радиуса входа осевой траектории пучка для КЦЛ с  $R/\rho = 2 \div 1000$  при длине  $l \leq 2R$ . Как показали наши результаты, при длинах линзы  $l \geq 3R$  эти формулы дают существенную погрешность. Поэтому представляет интерес найти кардинальные элементы во всем диапазоне изменения длины линзы.

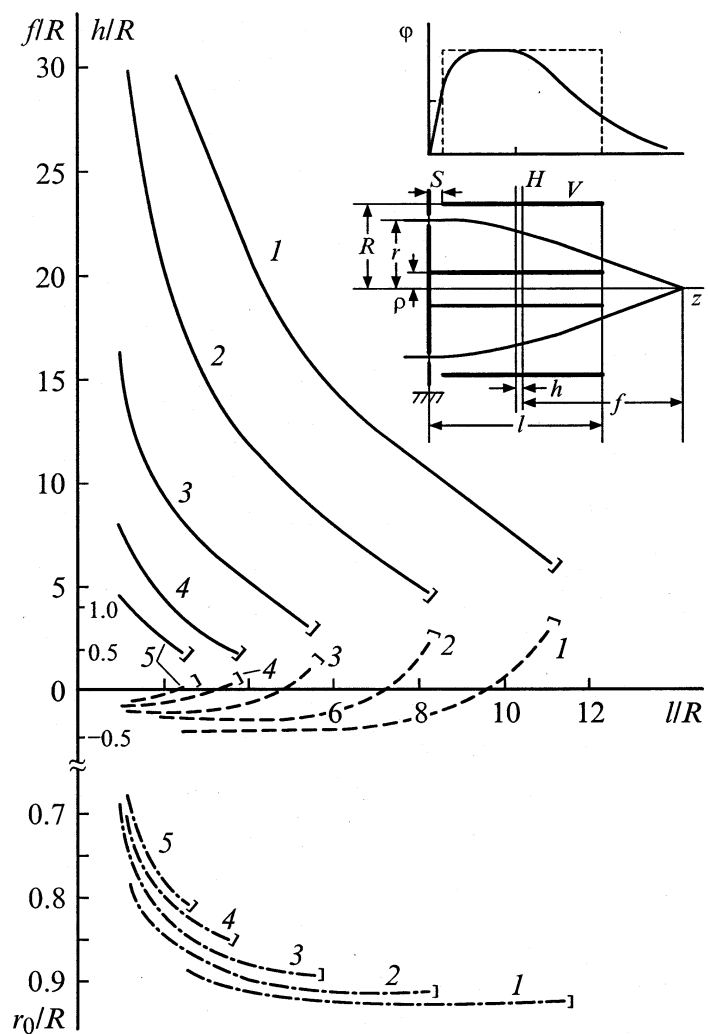
Авторами замечена некоторая закономерность, позволившая получить эмпирическую формулу для обобщенного возбуждения КЦЛ с плоской входной диафрагмой, учитывающую силу линзы, ее поперечные и продольные размеры:

$$q = (eV/\varepsilon)(l/R)^{2/3}R/(R - \rho). \quad (1)$$

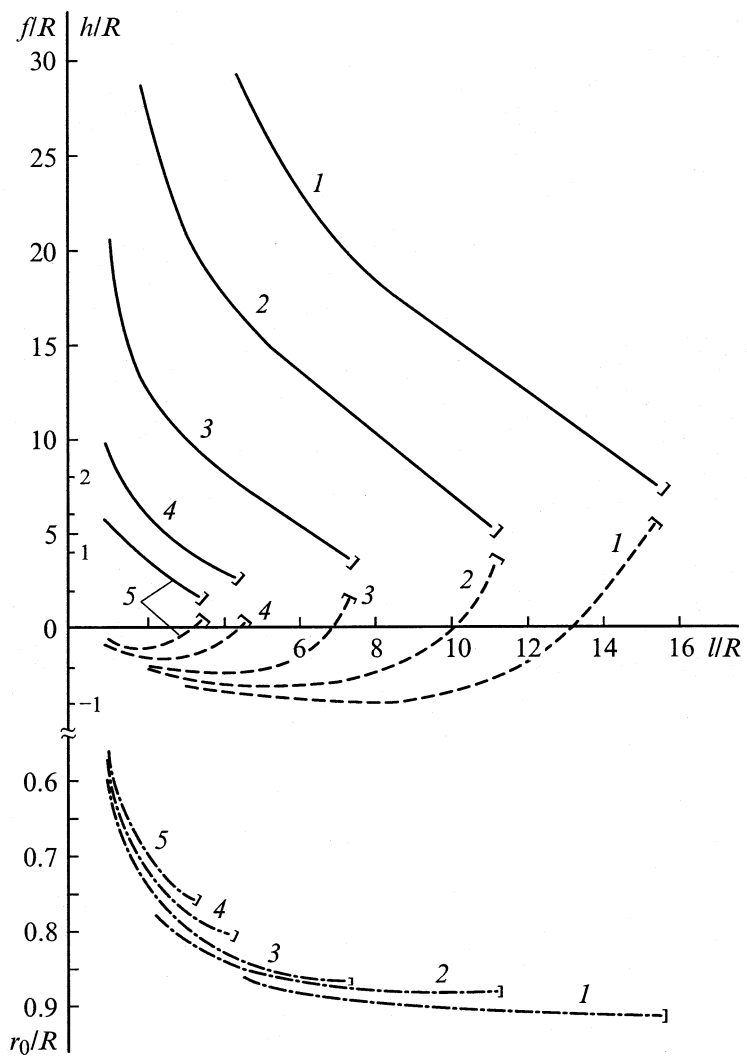
Следует отметить, что для фокусировки пучков (в первую очередь высоких энергий) желательно максимально уменьшать силу линзы. Численные расчеты показали, что КЦЛ с силой, не превышающей  $eV/\varepsilon = 0.3$ , обеспечивает фокусировку пучка на произвольном расстоянии от линзы вплоть до величины  $\approx 0.5R$ . Поэтому при выводе формул для кардинальных элементов мы ограничились указанной выше величиной силы КЦЛ.

Найденное обобщенное возбуждение позволило получить очень простую эмпирическую формулу для положения фокуса, отсчитываемого от средней плоскости линзы,  $l_f = f + h$ :

$$l_f/R = 1.8/q. \quad (2)$$



**Рис. 1.** Фокусные расстояния (сплошные кривые), положения главной плоскости (штриховые кривые) и радиусы входа осевой траектории пучка (штрихпунктирные кривые) в зависимости от длины линзы при  $R/\rho = 10$ . Кривая 1 —  $eV/\varepsilon = 0.03$ , 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.2, 5 — 0.3.



**Рис. 2.** То же, что на рис. 1, при  $R/\rho = 100$ .

При этом эмпирическая формула для радиуса входа осевой траектории пучка, вокруг которой происходит фокусировка на ось линзы, такова:

$$r_0/R = 0.3(3 \operatorname{th} l/R - q). \quad (3)$$

Положения фокусов, определяемые из (2) с учетом (1), в широкой области изменения длины линзы отличаются от рассчитанных численно не более, чем на 25%. Исключение составляют режимы, когда фокус расположен вблизи выхода из линзы (на расстоянии менее диаметра внешнего цилиндра), при этом погрешность доходит до 50%. Что касается величин начальных радиусов входа осевой траектории, определяемых по формуле (3), то их максимальное отличие от численных расчетов не превышает (10–12)%.

Представляет интерес сравнение силы коаксиальной цилиндрической и квадрупольной линз. Если фокусное расстояние квадрупольной линзы превышает приблизительно две ее длины, то справедливо приближение слабых линз. При этом отношение фокусного расстояния КЦЛ к фокусному расстоянию квадрупольной линзы при их одинаковых продольных и поперечных размерах примерно равно  $(l/R)^{1/3}$ . Это означает, что при  $l \geq 2R$  последняя сильнее КЦЛ. Однако, поскольку для фокусировки в точку требуется как минимум две квадрупольные линзы, естественно сравнивать КЦЛ с дублетом. Расчеты показали, что при одинаковой длине КЦЛ и квадрупольного дублета фокусное расстояние КЦЛ по крайней мере в 3 раза меньше. Кроме того, в случае равномерного распределения интенсивности по углу в источнике светосила КЦЛ существенно больше, чем у системы из квадрупольных линз, так как при одинаковых углах раствора интенсивность полого пучка на порядок выше, чем приосевого. Поэтому в приборах и устройствах с кольцевыми пучками предпочтительнее применять коаксиальную линзу из двух цилиндров и плоской входной диафрагмы.

## Список литературы

- [1] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 6. С. 39–44.
- [2] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 12. С. 81–82; ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 6. С. 124–127.