

Кардинальные элементы коаксиальной электростатической линзы

© Л.П. Овсянникова, Т.Я. Фишкова

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

(Поступило в Редакцию 23 декабря 1996 г.)

Коаксиальные электростатические линзы в комбинации с магнитным полем используются в плазмооптических и манометрических приборах [1,2]. Известно также их применение в системах для транспортировки пучков заряженных частиц высоких энергий [3], так как наряду с квадрупольными линзами они обладают большой оптической силой. В работе [4] получены выражения для траекторий заряженных частиц невысоких энергий в приближении прямоугольной модели поля при учете изменения энергии на входе в поле и выходе из него. Показана принципиальная возможность получения фокусировки параллельного пучка в кольцо.

В работе [5] нами найдены ранее неизвестные режимы работы коаксиальной цилиндрической линзы (КЦЛ) с фокусировкой пучка на ось линзы. Кроме того, в этой работе проведено сравнение КЦЛ широко распространенными электростатическими осесимметричными и квадрупольными линзами и показаны ее преимущества по оптической силе и светосиле. Следует отметить, что особенностью КЦЛ является проведение не сплошных, а полых пучков заряженных частиц и фокусировка их вокруг криволинейной осевой траектории.

Цель настоящей работы — определение кардинальных элементов КЦЛ в режиме фокусировка "точка в точку" на ось линзы. При этом геометрия линзы и ее сила менялись в широких пределах.

КЦЛ состоит из двух коаксиальных цилиндров с торцевой диафрагмой на входе, имеющей потенциал внутреннего цилиндра. Расчет траекторий пучка заряженных частиц, входящего параллельно ее продольной оси, и определение режимов работы, при которых осуществляется фокусировка полого пучка на ось линзы, проведены на компьютере по программам двумерной электронной оптики. На основании этих расчетов определены кардинальные элементы: фокусные расстояния, положения главной плоскости, а также радиусы осевой траектории на входе в линзу. Результаты представлены на рис. 1 и 2. В правом углу рисунков приведены геометрия КЦЛ и ход криволинейной осевой траектории пучка, а также распределение потенциала вдоль этой траектории, нормированное на единицу. Здесь R и ρ — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров; l — длина цилиндрических электродов; r_0 — радиус осевой траектории пучка на входе; f — фокусное расстояние КЦЛ; h — положение ее главной плоскости H , отсчитываемое от средней плоскости линзы.

Из рисунков видно, что с ростом возбуждения линзы $F = eV/\varepsilon$ (V — разность потенциалов между цилиндрическими электродами, ε — энергия пучка) величина фокусного расстояния падает приблизительно по гиперболическому закону. При некотором $F = F_{\max}$ пучок садится на внутренний цилиндр (F_{\max} увеличивается с ростом R/ρ , но уменьшается с ростом l). Главная плоскость может совпадать со средней плоскостью линзы либо быть смещена по обе стороны от нее, т.е.

$-0.3 \leq h/R \leq 0.3$ для $l = R$ и $-0.7 \leq h/R \leq 0.4$ для $l = 2R$. При этом зависимость расстояния h от возбуждения линзы изменяется приблизительно по квадратичному закону. Что касается начальной координаты входа в линзу осевой траектории пучка, то ее зависимость от возбуждения является линейной, причем координата r_0 уменьшается при возрастании возбуждения КЦЛ, а

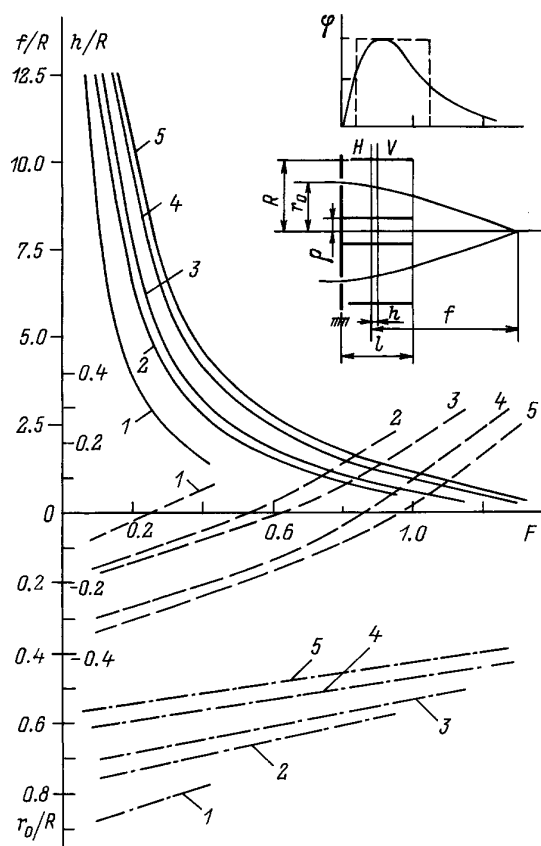


Рис. 1. Фокусные расстояния (сплошные кривые), положения главной плоскости (штриховые кривые) и значения координаты входа осевой траектории пучка (штрихпунктир) в зависимости от возбуждения коаксиальной цилиндрической линзы при различных соотношениях радиусов внешнего и внутреннего цилиндров. R/ρ : 1 — 2, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 100, 5 — 1000. Длина линзы $l = R$.

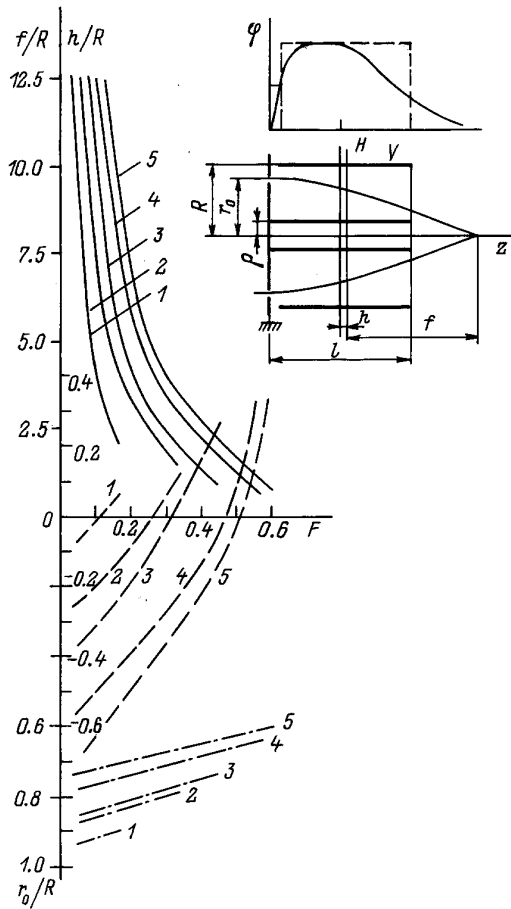


Рис. 2. То же, что на рис. 1, при длине коаксиальной цилиндрической линзы $l = 2R$.

также соотношения радиусов R/ρ и увеличивается с ростом длины линзы.

Следует сказать о трудностях аналитического расчета КЦЛ. Были предложены модели, аппроксимирующие поле вблизи краев линзы [5,6]. Однако полученные формулы для траекторий не позволяют в явном виде записать выражения для кардинальных элементов КЦЛ. Поэтому в данной работе на основе численного эксперимента с учетом отмеченного нами выше характера зависимостей кардинальных элементов КЦЛ от ее возбуждения найдены для них простые эмпирические формулы.

Значения входной координаты осевой траектории пучка при изменении возбуждения линзы хорошо ложатся на прямую. Угол наклона и смещение по оси ординат этих прямых зависят от геометрии линзы. Причем для данной длины линзы при различных соотношениях радиусов цилиндров прямые близки к параллельным. Выражение для семейства прямых, определяющих входную координату осевой траектории, можно аппроксимировать следующим образом:

$$r_0/R = -0.12[l/R + 1/\ln(R/\rho)]F + 0.54(l/R)^{1/2}[(l/R)^{-3/2}(\rho/R)^{1/2} + 1]. \quad (1)$$

Сравнение расчетов, проведенных по этой формуле, с результатами численного эксперимента показало, что различие не превышает 5% для $l/R = 1$ и 2 при изменении R/ρ в широких пределах ($2 \leq R/\rho \leq 1000$).

Анализ численных расчетов показал, что зависимость фокусного расстояния от параметра, являющегося обратной величиной возбуждения линзы, носит линейный характер. Нами замечено, что при одной и той же длине линзы с изменением соотношения радиусов цилиндров эти прямые выходят практически из одной точки, смещенной относительно начала координат. Причем смещение по оси абсцисс постоянно, а по оси ординат зависит от длины линзы. Угол наклона этих прямых увеличивается при возрастании отношения радиусов внешнего и внутреннего цилиндров и уменьшается с ростом длины линзы. В результате проведенного поиска получена простая формула для фокусного расстояния КЦЛ

$$f/R = [\ln(R/\rho)]^{1/2}(l/R)^{-1/2} \times [(1/F) - 0.5] - 0.3(l/R)^2. \quad (2)$$

Расхождение между расчетами по этой формуле и численными не превышает 25% по всей рабочей области линзы. Получена также эмпирическая формула для положения главной плоскости, отсчитываемого от средней плоскости линзы. Она описывает, так же как и приведенные выше формулы для других кардинальных элементов, семейство кривых в широких пределах изменения геометрии линзы

$$h/R = 0.11/R \left\{ 1 - 1.7[\ln(R/\rho)]^{1/2} + 3.7(F l/R)^2 \right\}. \quad (3)$$

Расчеты, проведенные по этой формуле, отличаются от численных значений не более чем на 0.05R.

Таким образом, получены простые эмпирические формулы для кардинальных элементов электростатической коаксиальной цилиндрической линзы, удобные для инженерных расчетов. Проведенные численные расчеты на ЭВМ показали, что эти формулы обеспечивают хорошую точность в широком диапазоне изменения геометрических параметров линзы.

Список литературы

- [1] Морозов А.И., Лебедев С.В. // Вопросы теории плазмы. М.: Атомиздат, 1974. № 8. С. 247–281.
- [2] Афанасьев В.П., Выдрик А.А., Овсянникова Л.П., Шпак Е.В. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 8. С. 1797–1805.
- [3] Krejčík P., King B.V., Kelly I.C. // Optik. 1980. Vol. 55. P. 385–393.
- [4] Овсянникова Л.П., Пасовец С.В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 12. С. 2351–2354.
- [5] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 16. С. 39–44.
- [6] Ovsyannikova L.P., Pasovets S.V., Shpak E.V. // NIM. A298. 1990. P. 344–348.