

Влияние краевого поля на фокусирующие свойства коаксиальной цилиндрической линзы

© Л.П. Овсянникова, Т.Я. Фишкова

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

(Поступило в Редакцию 22 мая 1997 г.)

В широком диапазоне изменения геометрии коаксиальной цилиндрической линзы исследовано влияние расстояния между входной заземленной плоской диафрагмой и внешним цилиндрическим электродом, которое определяет краевое поле линзы. Получено, что фокусировка пучка заряженных частиц на ось линзы достигается в широкой области только в случае малых зазоров между диафрагмой и внешним электродом. Показано, что при альтернативном питании, когда внешний цилиндрический электрод заземлен, а на внутренний подается напряжение, нарушается фокусировка пучка вообще и на ось линзы в частности.

В работах [1,2] найдены и исследованы в широком диапазоне изменения геометрических и электрических параметров, режимы работы коаксиальной цилиндрической линзы с фокусировкой полого пучка заряженных частиц на ось линзы. Получены также простые эмпирические формулы кардинальных элементов такой линзы. При этом зазор между заземленной торцевой диафрагмой на входе в линзу и внешним цилиндрическим электродом был значительно меньше поперечного и продольного размеров коаксиальной цилиндрической линзы. Поскольку этот зазор определяет конфигурацию краевого поля, он должен существенно влиять на фокусирующие свойства линзы. Исследованию влияния местоположения входной диафрагмы и посвящена данная работа.

На рис. 1, *a* представлена коаксиальная цилиндрическая линза, состоящая из двух цилиндрических электродов, плоской торцевой диафрагмы со стороны входа и открытым задним торцом. Внутренний электрод и диафрагма выполнены как единое целое с заземленным кожухом, к которому через изолятор крепится внешний электрод. Подача на последний потенциала V при заземленных диафрагме и внутреннем электроде приводит к возникновению поля в линзе, поэтому в дальнейшем будем называть внешний цилиндрический электрод полезадающим.

Эквипотенциали такой линзы с малой абсолютной величиной потенциала проходят вблизи внутреннего электрода, охватывая его, затем идут практически параллельно торцевой диафрагме и, наконец, замыкаются в пространстве между кожухом и внутренним электродом. При этом вследствие наличия открытого заднего торца они проникают в свободное от электродов пространство. Эквипотенциали с большой абсолютной величиной потенциала имеют более простую конфигурацию, меньшую протяженность и охватывают полезадающий электрод с внешней и внутренней стороны. Из рис. 1, *b* также видно, что в области диафрагмы, близко расположенной к полезадающему электроду (область краевого поля на входе в линзу), величины потенциала при фиксированном радиусе возрастают с ростом продольной координа-

ты, в то время как при отсутствии диафрагмы (область краевого поля на выходе из линзы) вблизи внутреннего электрода потенциал сначала возрастает, а затем падает. В остальной области выходного краевого поля зависимость потенциала от продольной координаты аналогична этой зависимости для входного краевого поля. Следует сказать, что при наличии диафрагмы, достаточно удаленной от полезадающего электрода, картина распределения потенциала аналогична картине поля без диафрагмы. Конкретные значения потенциалов, определяющие вид эквипотенциалей и скорость спада краевого поля при

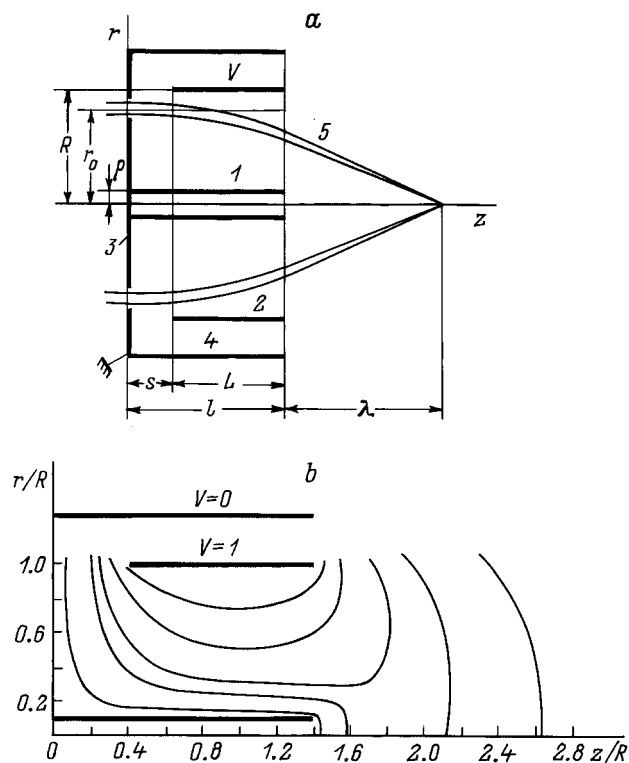


Рис. 1. *a* — коаксиальная цилиндрическая линза: 1, 2 — цилиндрические электроды, 3 — плоская диафрагма, 4 — кожух, 5 — траектории заряженных частиц; *b* — картина эквипотенциалей.

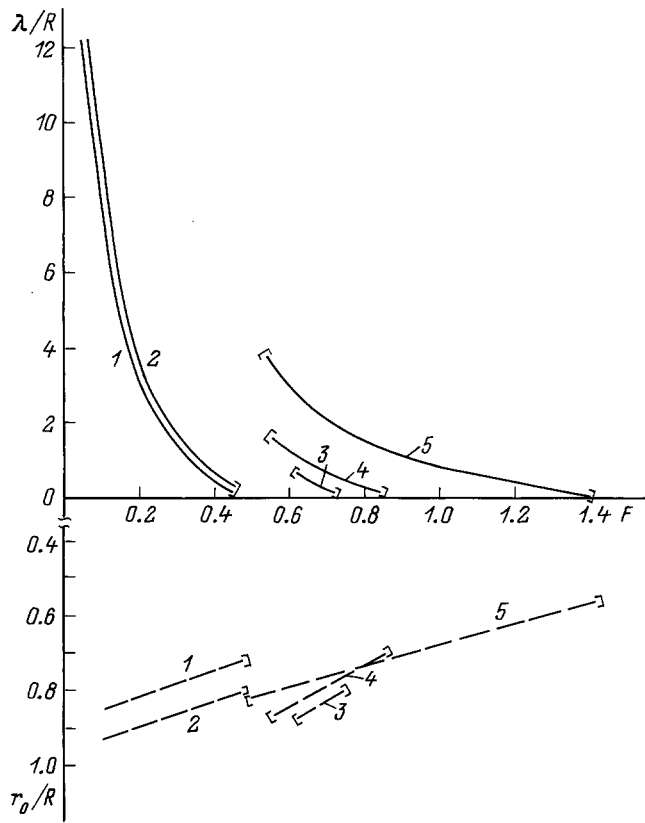


Рис. 2. Зависимость положения фокуса (сплошные кривые) и радиуса осевой траектории пучка (штриховые кривые) от возбуждения линзы с $R/\rho = 10$ и $l/R = 2 = \text{const}$ при различных зазорах между диафрагмой и полезающим электродом. s/R : 1 — 0.1, 2 — 0.25, 3 — 0.75, 4 — 1.0, 5 — 1.5.

удалении от полезающего электрода, зависят от геометрии коаксиальной цилиндрической линзы.

Траектории пучка заряженных частиц рассчитывались численные на компьютере по программе *ТЕО* для двумерных электростатических полей. Рассматривались пучки, входящие в коаксиальную цилиндрическую линзу параллельно ее продольной оси, и определялись режимы работы, обеспечивающие фокусировку пучка на ось линзы. Для характерной геометрии линзы с соотношением радиусов большого и малого цилиндров $R/\rho = 10$ варьировалось в широких пределах расстояние от диафрагмы до полезающего электрода $0 < s/R \leq 1.5$. При этом длина последнего менялась в пределах $0.5 \leq L/R \leq 1.9$, так что длина линзы от диафрагмы до заднего торца оставалась неизменной ($l = L + s = 2R = \text{const}$). Минимальные расстояния s/R определяются величиной напряжения пробоя, максимальные расстояния ведут к сильному возрастанию возбуждения линзы из-за уменьшения длины полезающего электрода.

На рис. 2 представлены результаты расчета: зависимость положения фокуса, отсчитываемого от заднего края линзы, и радиуса входа осевой траектории пучка, вокруг которой осуществляется фокусировка, от возбу-

ждения линзы F ($F = eV/\varepsilon$, где e — заряд частицы, ε — ее энергия). Скобочками на рисунке отмечены минимальные и максимальные возбуждения линзы, ограничивающие область существования фокусировки. При малых зазорах ($s \leq 0.3R$) фокусировка осуществляется в широком диапазоне изменения расстояния от выхода из линзы до фокуса ($100 \leq \lambda/R \leq 0.2$), при этом

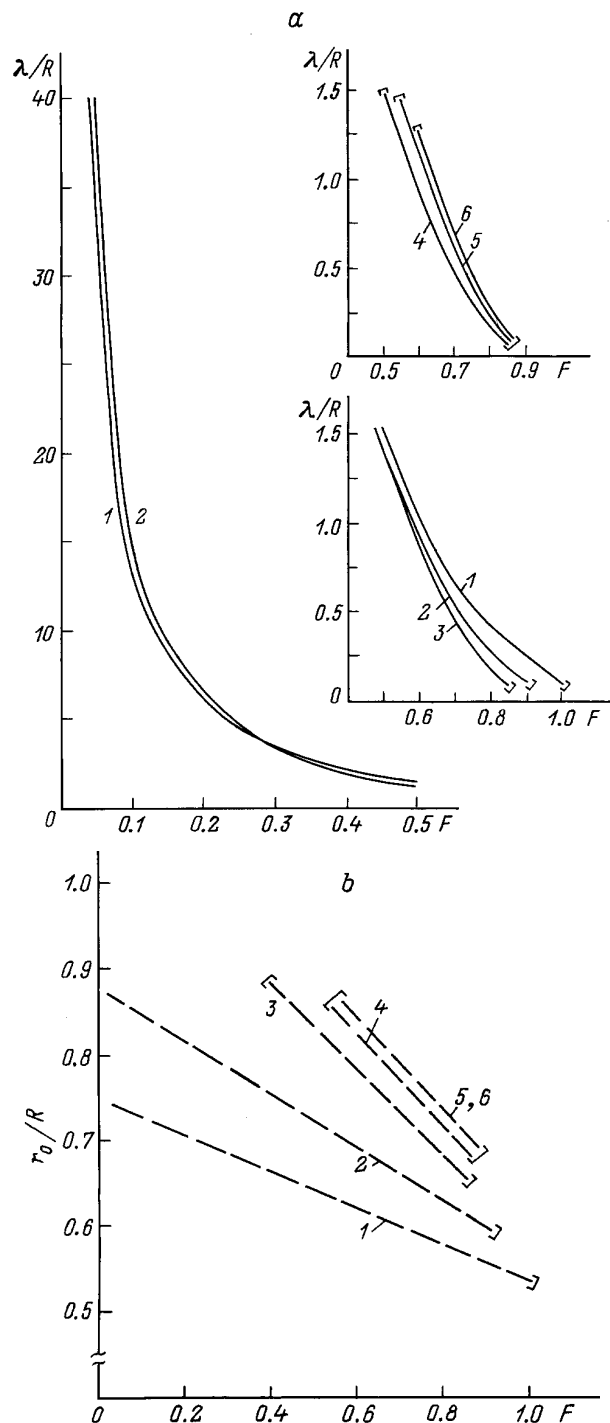


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для линзы с $R/\rho = 10$ и $L/R = 1$ (a, b). s/R : 1 — 0.1, 2 — 0.25, 3 — 0.4, 4 — 0.5, 5 — 1.0, 6 — 2.0.

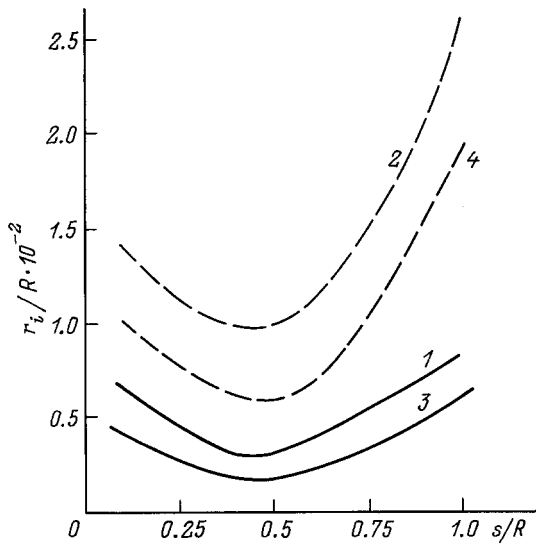


Рис. 4. Размер сфокусированного пятна при изменении зазора между диафрагмой и полезадающим электродом для коаксиальной цилиндрической линзы с $R/\rho = 10$ и $L/R = 1$. Сплошные кривые — $\Delta r_0 = 0.05R$, штриховые — $\Delta r_0 = 0.1R$; 1, 2 — $\lambda = 0.5R$; 3, 4 — $\lambda = R$.

величина минимально достижимого положения фокуса уменьшается с уменьшением зазора. При больших зазорах $s \cong R$ область фокусировки существенно сужается, при $s = 0.5R$ фокусировки пучка вообще не существует. Радиус входа осевой траектории пучка в режиме фокусировки убывает с ростом возбуждения линзы по линейному закону, при этом с ростом зазора он сначала возрастает (кривые 1–3), а затем падает (кривые 4, 5).

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что с точки зрения фокусировки параллельного пучка на ось линзы следует использовать конструкции коаксиальных цилиндрических линз с малым зазором между входной диафрагмой и полезадающим электродом.

Представляет интерес исследовать влияние краевого поля на фокусировку коаксиальной цилиндрической линзы, у которой длина полезадающего электрода не меняется. Последняя выбиралась из условия, чтобы разность потенциалов между электродами не превышала величины ускоряющего потенциала, т.е. возбуждение линзы было $F \leq 1$. Рассчитана линза с $R/\rho = 10$ и $L = R = \text{const}$ при изменении зазора в пределах $0 < s/R \leq 2$. В этом случае общая длина линзы от диафрагмы до заднего торца меняется в пределах $1 < lR \leq 3$. Результаты численного расчета даны на рис. 3. Как видно, фокусировка существует во всем диапазоне изменения длины зазора, определяющего краевое поле. Однако начиная с $s = 0.4R$ (кривые 3–6) область фокусировки находится вблизи линзы и не превышает $\lambda \cong 2R$, причем с ростом зазора эта область уменьшается. Следует отметить, что положение фокуса и величина начального радиуса осевой траектории пучка при зазорах $s = R$ и $s = 2R$ практически совпадают.

Следовательно, делать зазоры больше радиуса внешнего цилиндрического электрода с точки зрения фокусировки пучка не имеет смысла.

При малых зазорах между входной диафрагмой и полезадающим электродом ($s \leq 0.3R$) фокусировка существует в широких пределах, причем если с увеличением зазора положение фокуса меняется мало (кривые 1, 2 на рис. 3, а), то величины радиуса осевой траектории на входе в коаксиальную цилиндрическую линзу меняются заметно (кривые 1, 2 на рис. 3, б). Отметим, что при увеличении отношения радиусов электродов область по s , в которой осуществляется фокусировка, несколько увеличивается и при $R/\rho = 100$ составляет $0 < s \leq 0.4R$. При уменьшении отношения радиусов указанная область существенно сужается, и при $R/\rho = 2$ максимальная величина зазора $s = 0.1R$.

Для выбора оптимальной геометрии коаксиальной цилиндрической линзы большое значение имеет качество фокусировки, которое определяется размером пятна в радиальном направлении, формируемого линзой в режимах фокусировки кольцевого пучка на ось линзы. На рис. 4 дана зависимость радиуса пятна в плоскости, проходящей через точку пересечения продольной оси линзы осевой траекторией пучка, вокруг которой осуществляется фокусировка, от величины зазора между диафрагмой и полезадающим электродом. Сплошные кривые относятся к толщине кольца на входе в коаксиальную цилиндрическую линзу $\Delta r_0 = 0.05R$, штриховые — к $\Delta r_0 = 0.1R$. В области малых зазоров размер сфокусированного пятна на два порядка меньше толщины входного кольца, в то время как при $s \geq R$ этот размер существенно возрастает. К тому же при $s \geq 0.4R$, как видно из рис. 3, область фокусировки мала. Поэтому геометрия коаксиальной цилиндрической линзы с большими расстояниями между входной диафрагмой и полезадающим электродом не представляет интереса с точки зрения фокусировки пучка на ось линзы.

На рис. 5 представлена зависимость размера сфокусированного на ось пучка в широком диапазоне изменения положения фокуса при малых зазорах между диафрагмой

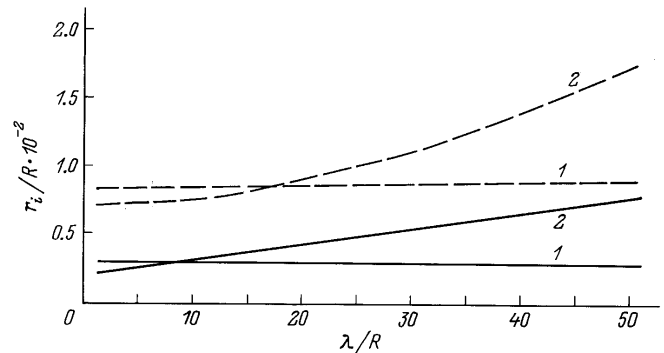


Рис. 5. Зависимость размера пятна от его положения, отсчитываемого от края линзы, при малых зазорах между диафрагмой и полезадающим электродом. s : 1 — $0.1R$, 2 — $0.25R$; сплошные кривые — $\Delta r_0 = 0.05R$, штриховые — $\Delta r_0 = 0.1R$.

и полезадающим электродом для коаксиальной цилиндрической линзы с отношением радиусов электродов $R/\rho = 10$. Из рисунка видно, что лишь в области $2 \leq \lambda/R \leq 10$ размер пятна у линзы с зазором $s = 0.25R$ несколько меньше, чем при $s = 0.1R$. В остальной области при изменении положения сфокусированного пятна зазор $s = 0.1R$ обеспечивает наименьший размер пятна, величина которого практически не меняется (при $\Delta r_0 = 0.005R$ радиус пятна $r_i \cong 0.003R$, при $\Delta r_0 = 0.1R$ он равен $r_i \cong 0.009R$).

Таким образом, для коаксиальной цилиндрической линзы в широком диапазоне изменения соотношения радиусов цилиндрических электродов при различных длинах полезадающего электрода оптимальной с точки зрения фокусировки пучка на ось является величина зазора между входной диафрагмой и полезадающим электродом $s \leq 0.1R$. В этом случае для определения положения фокуса и радиуса осевой траектории пучка, вокруг которой происходит фокусировка, можно воспользоваться соответствующими формулами работы [2].

В заключение отметим, что была исследована коаксиальная цилиндрическая линза с альтернативным питанием, когда напряжение подается на внутренний электрод при заземленных внешнем цилиндре и диафрагме. В этом случае упрощается конструкция линзы, так как отпадает необходимость в наличии кожуха, а внутренний электрод через изолятор крепится к диафрагме. Однако такое питание приводит к существенному изменению краевого поля на входе в линзу и, как следствие, вызывает иной ход пучка, ведущий к нарушению фокусировки вообще и на ось линзы в частности. Это связано с тем, что частицы в краевом поле ускоряются, причем это ускорение, а также радиальная сила линзы уменьшаются с ростом радиуса. При основном питании (рис. 1) частицы замедляются, при этом замедление и радиальная сила линзы растут с ростом радиуса.

Список литературы

- [1] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 2. Вып. 16. С. 39–44.
- [2] Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 8. С. 89–91.