

01;12

Фокусировка заряженных частиц в электрических линзах с импульсным питанием

© А.А. Трубицын, Е.Ю. Грачев, Д.Ю. Тарабрин

Рязанский государственный радиотехнический университет

E-mail: assur@bk.ru

Поступило в Редакцию 17 июня 2015 г.

Проведены численные исследования фокусирующих свойств одиночной электронной линзы с импульсным питанием. Показана возможность уменьшения диаметра наименьшего сечения сфокусированного потока частиц более чем на порядок по сравнению со статическим режимом.

В устройствах переноса изображений и транспортировки потоков заряженных частиц широко используются аксиально-симметричные, в том числе одиночные линзы. Простейшая электростатическая аксиально-симметричная одиночная линза состоит из трех последовательно расположенных цилиндрических (или апертурных) электродов. Крайние электроды поддерживаются при одинаковом (чаще всего нулевом) потенциале. На средний электрод подается либо положительный, либо отрицательный фокусирующий потенциал.

Одиночные линзы в статическом режиме практически полностью исследованы (экспериментально и теоретически), и их возможности исчерпаны [1].

К основному недостатку статических электронных линз относится невозможность устранения хроматических и сферических aberrаций. Уменьшение и даже исключение aberrаций возможно лишь за счет перехода от статического способа фокусировки непрерывных потоков электронов к фокусировке пакетов частиц импульсными полями.

В частности, полное исключение хроматических aberrаций достигается в изотраекторном режиме [2], когда при движении пакета электронов потенциалы на электродах электронно-оптической системы уменьшаются пропорционально $1/t^2$, где t — время движения частицы, отсчитываемое от момента старта в бесполевого пространстве. Компенсация различий траекторий медленных и быстрых частиц обеспечивает-

ся тем, что менее энергичные частицы попадают и движутся в поле с меньшей отклоняющей силой и наоборот.

Что касается сферических aberrаций, то имеются экспериментальные данные (см., например, [3]), свидетельствующие о возможности их ограничения при фокусировке пакетов электронов подачей на электроды линзы импульсов прямоугольной формы.

В данной работе проведено численное исследование фокусирующих свойств одиночной линзы при подаче на центральный электрод импульса напряжения в некоторый момент времени после начала движения частиц. Исследование проводилось средствами авторской программы „ФОКУС“ [4]. В программу интегрированы графический модуль создания и модификации конструкции электронно-оптической системы (ЭОС), модуль расчета электростатического поля методом граничных элементов [5], модуль траекторного анализа статических и динамических ЭОС с контролем точности вычислений, модуль численного поиска условий пространственных [6] и времяпролетных [7] фокусировок.

Наблюдаемые и описанные ниже эффекты уменьшения сферических aberrаций обусловлены следующим. В статической линзе с потенциалом среднего электрода, полярность которого совпадает со знаком заряда частицы, неосевой электрон при движении испытывает сначала расфокусирующее, затем фокусирующее и затем снова расфокусирующее действие поля [1]. При этом действие фокусирующего поля оказывается более сильным, и поэтому в целом одиночная линза оказывается собирающей. Однако при увеличении радиальной координаты электрона r усиливается преобладание фокусирующей силы поля, что в конечном счете приводит к неустранимости сферических aberrаций изображения. Поэтому можно ожидать, что уменьшение воздействия фокусирующей области поля при увеличении r приведет к улучшению качества фокусировки в целом. Предлагаемый способ ослабления такого влияния заключается в том, что электрическое поле включается лишь после прохождения электроном части рабочего пространства линзы, соответствующего первому дефокусирующему участку и некоторой части фокусирующего участка статической линзы.

На рис. 1, *a* продемонстрирован результат фокусировки электронного потока статической одиночной линзой, а на рис. 1, *b* — линзой, в которой напряжение на центральный (фокусирующий) электрод подается скачкообразно в момент времени t_0 .

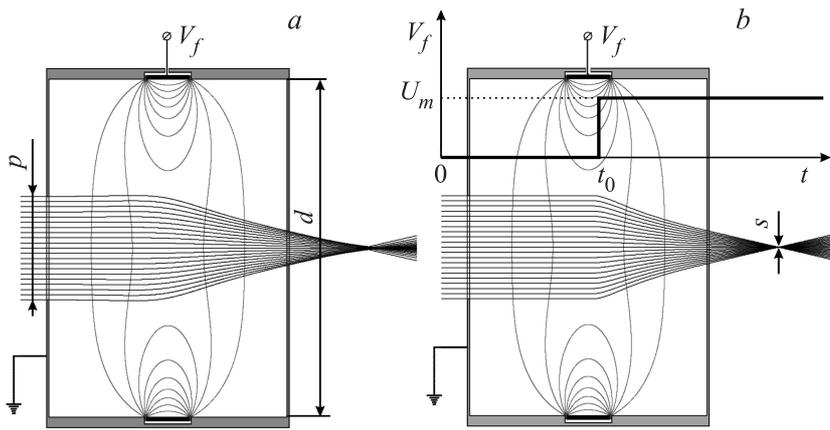


Рис. 1. Фокусировка электронного потока одиночной линзой: *a* — в статическом режиме, *b* — в режиме скачкообразного изменения напряжения.

Численный эксперимент проводился при фиксированной начальной энергии заряженных частиц $E = 4.1$ rel.u., имеющих массу $m = 1$ rel.u. и заряд $q = 1$ rel.u. и влетающих в линзу параллельно оси симметрии. Отношение входного диаметра потока к диаметру линзы составляло $p/d = 0.3$. Измерения диаметра наименьшего сечения потока s производились в условиях фиксированного фокусного расстояния линзы, соответствующего фокусному расстоянию статической линзы при потенциале фокусирующего электрода $V_f = 1$ rel.u. Фиксация фокусного расстояния в динамическом режиме обеспечивалась регулировкой величины скачка напряжения U_m . Численный анализ линзы с импульсным питанием проводился в приближении бесконечно малой длительности электронного пакета и нулевой длительности фронта нарастания напряжения.

На рис. 2, *a* представлены результаты измерений относительного диаметра наименьшего сечения s/p потока частиц при изменении времени t_0 запуска импульса напряжения. Время запуска t_0 задавалось в процентах от полного времени пролета. Следует отметить, что в условиях реального эксперимента момент запуска t_0 является регулируемым и настраиваемым параметром. На рис. 2, *b* показана зависимость величины скачка напряжения U_m , обеспечивающего постоянство фокусного расстояния линзы, от момента запуска импульса t_0 . Момент запуска $t_0 = 0$ соответствует статическому режиму.

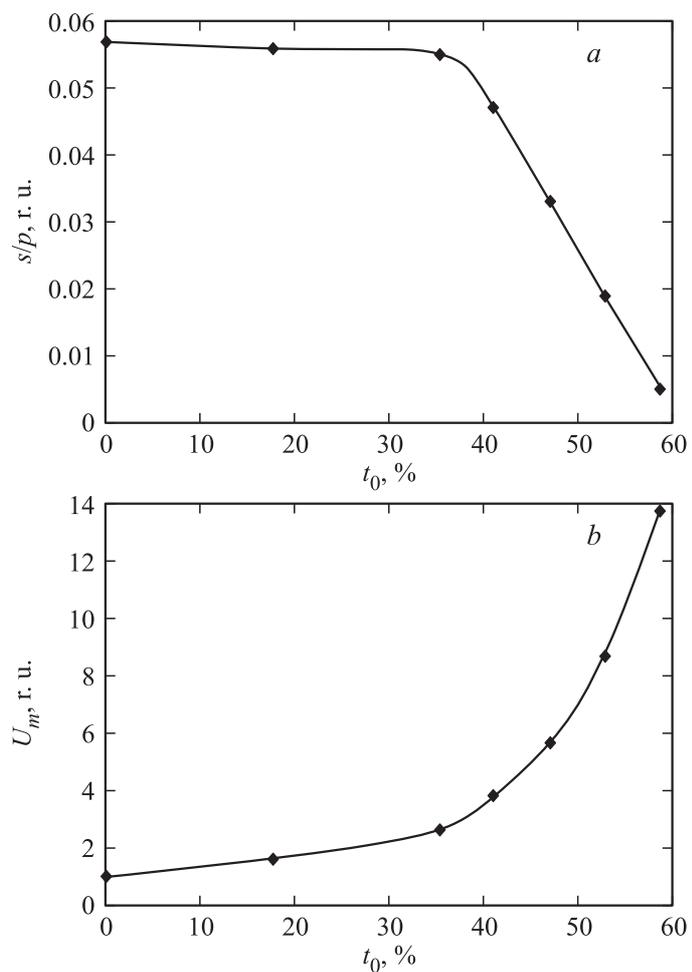


Рис. 2. Фокусировка электронных потоков в импульсном режиме: *a* — зависимость относительного диаметра наименьшего сечения от момента запуска импульса напряжения, *b* — необходимая для фиксации фокусного расстояния линзы величина скачка напряжения на фокусирующем электроде.

Данные численного эксперимента, демонстрируемые рис. 2, а, позволяют сделать вывод о возможности существенного улучшения качества фокусировки электронных потоков в линзах с импульсным питанием. В частности, если в статическом режиме относительный диаметр наименьшего сечения составляет $s/p = 0.0573$, то в динамическом режиме при $t_0 = 58.8\%$ и $U_m = 13.8 \text{ rel.u.}$ имеет на порядок меньшую величину $s/p = 0.0053$. Дополнительно заметим, что сферические аберрации одиночной линзы как в статическом, так и в представленном динамическом режимах определяются величинами третьего порядка малости относительно радиальной координаты влета, т.е. имеет место фокусировка второго порядка по радиальной координате в обоих случаях.

Дальнейшие исследования по теме статьи связаны с изучением влияния длительности пакета электронов, его некогерентности и непараллельности, а также конечности длительности фронта импульса напряжения на фокусирующие свойства одиночной линзы с импульсным питанием.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00132).

Список литературы

- [1] *Yavor M.* Advanced in Imaging and Electron Physics. Optics of Charged Particle Analyzers. Amsterdam: Elsevier, 2009. 381 p.
- [2] *Матышев А.А.* Изотракторная корпускулярная оптика. СПб.: Наука, 2000. 375 с.
- [3] *Schonhese G., Spiecker H.* // Microsc. Microanal. 2003. V. 9 (Suppl. S03). P. 34.
- [4] *Трубицын А.А.* // Прикладная физика. 2008. № 2. С. 56.
- [5] *Трубицын А.А.* // Журнал вычислит. матем. и матем. физики. 1995. Т. 35. № 4. С. 532.
- [6] *Трубицын А.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 5. С. 126.
- [7] *Trubitsyn A.A., Astakhov V.I., Grachev E.Yu.* The numerical techniques of conditions search of high order time-of-flight focusing // Abstracts of the Eighth International Conference on Charged Particle Optics (CPO-8). Singapore, 2010. P. 186.