

УДК 537.533

Исследование фокусирующих и пространственно-временных свойств нового типа трехмерных электростатических линз

Р. А. Бубляев, Г. А. Галеев

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

Л. А. Баранова

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

Впервые проведено исследование фокусирующих и пространственно-временных свойств различных трехмерных электростатических одиночных и иммерсионных линз, образованных плоскопараллельными электродами с одинаково ориентированными прямоугольными отверстиями. Расчеты проведены на лицензированной программе SIMION 3D (версия 7.0).

Повышение чувствительности времяпролетных масс-спектрометров с ортогональным вводом пучка ионов при максимальном сохранении их разрешающей способности потребовало исследования возможности введения в их схему электронно-оптических линз, которые формировали бы из слабо расходящегося ленточного пучка плоскопараллельный пучок. Для решения этой задачи предлагается новый тип трехмерных электростатических линз, образованных плоскопараллельными электродами с одинаково ориентированными прямоугольными отверстиями, которые могут работать как в одиночном, так и в иммерсионном режиме. Основное отличие предложенных линз от хорошо изученных щелевых (цилиндрических) линз [1] заключается в том, что они могут фокусировать заряженный пучок в двух плоскостях в заметно различающейся степени.

В настоящей работе проведено исследование фокусирующих и пространственно-временных свойств различных типов одиночных и иммерсионных линз, образованных плоскопараллельными электродами с одинаково ориентированными прямоугольными отверстиями, с отношениями сторон прямоугольных отверстий, равными 2, 3 и 4, и расстояниями между электродами, отнесенными к меньшему размеру отверстий, равными 0,25; 0,5 и 1.

Расчеты проводились на лицензированной программе SIMION 3D (версия 7.0). Корректность работы SIMION 3D по расчету существенно трехмерных полей и траекторий была протестирована на определении фокусных расстояний одиночных и иммерсионных скрещенных линз и их сравнении с данными, полученными ранее авторами экспериментально на электронно-оптической скамье [2, 3]. Проверка показала, что SIMION 3D позволяет рассчитывать фокусные расстояния таких линз с погрешностью 10–15 %.

Параллельный пучок ионов шириной 20 % от меньшего размера апертуры линзы запускался вдоль ее оси. Фокусное расстояние определялось как отношение расстояния от крайней траектории пучка до оси линзы к тангенсу угла наклона этой же траектории при пересечении ее с осью, т. е. $f = x_0 / \operatorname{tg} \alpha$, где x_0 — расстояние от крайней траектории пучка до оси линзы; α — угол наклона крайней траектории при пересечении ее с осью. Данная формула является справедливой, как для тонких, так и для толстых линз.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов зависимостей фокусных расстояний для одиночных (см. рис. 1, а) и иммерсионных (см. рис. 1, б) линз при изменении отношения сторон апертуры и изменении расстояния между электродами, соответственно. Для удобства использования результатов расчета фокусные расстояния f приведены в относительных единицах $f/2b$, где $2b$ — меньший размер апертуры линзы; потенциал на линзе — в виде отношения потенциалов $(V_1 - V_2)/V_1$, где V_1 и V_2 — потенциалы на крайнем и среднем электродах для одиночной линзы, а для иммерсионной линзы V_1 и V_2 — потенциалы пространства источника и пространства изображения, соответственно. Во всех представленных расчетах при изменении отношения сторон апертуры расстояние между электродами поддерживалось равным $h/2b = 1$, а при изменении расстояния между электродами отношение сторон $2a/2b = 3$. Здесь и далее на всех представленных рисунках заштрихованные символы на графиках относятся к иммерсионным линзам, а прозрачные — к одиночным. Следует отметить, что в данной статье приводятся данные для плоскости меньшего размера апертуры, так как в плоскости большей апертуры действие линзы заметно слабее, и фокусные расстояния в несколько раз больше для одиночных линз и более чем на порядок — для иммерсионных.

Из рис. 1 видно, что фокусное расстояние как для одиночных, так и для иммерсионных линз

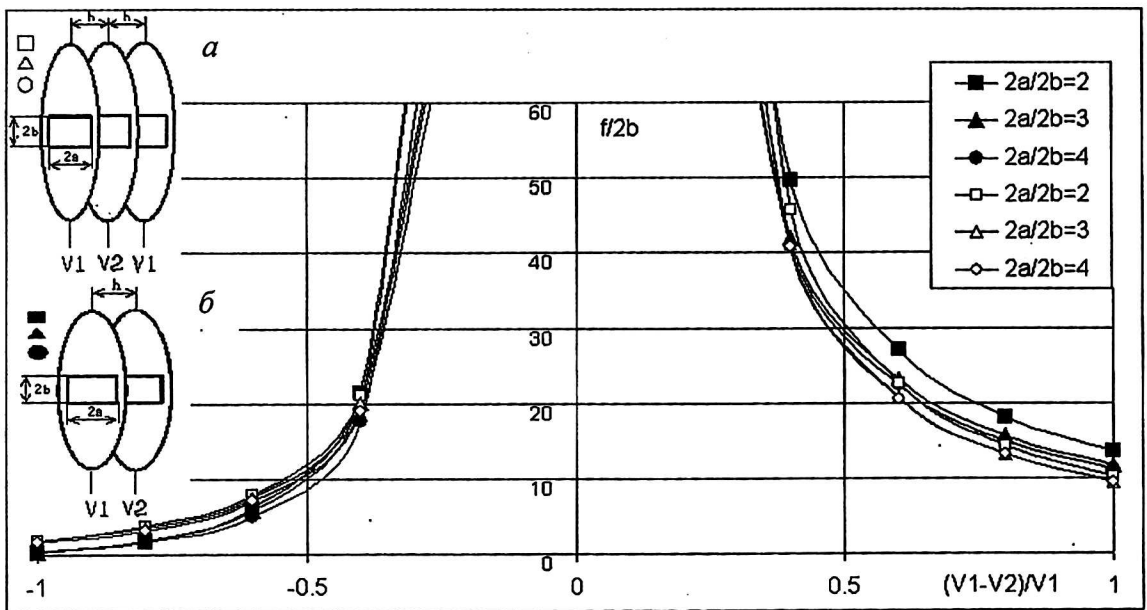


Рис. 1. Зависимость фокусного расстояния f одиночных и иммерсионных линз с различными отношениями сторон апертуры $2a/2b$

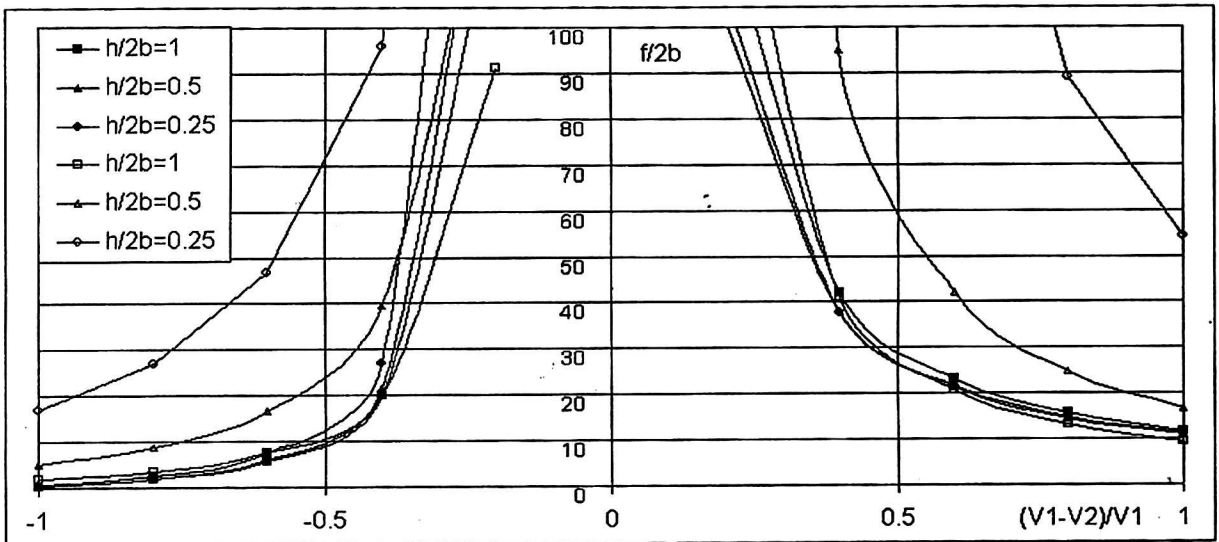


Рис. 2. Зависимость фокусного расстояния f одиночных и иммерсионных линз с различными расстояниями между электродами h

слабо зависит от величины отношения сторон апертуры, хотя и растет с его увеличением, приближаясь в пределе к значениям фокусных расстояний щелевых (цилиндрических) линз. Линзы, работающие при ускоряющем потенциале на среднем электроде ($(V_1 - V_2)/V_1 > 0$), оказываются более слабыми, нежели линзы, работающие при тормозящем потенциале ($(V_1 - V_2)/V_1 < 0$).

Зависимость фокусного расстояния от величины расстояния между электродами линзы выражена заметнее у одиночных линз (см. рис. 2), т. е. фокусное расстояние возрастает у одиночной линзы в 3–5 раз при уменьшении межэлектродного расстояния в 4 раза, в то время как для иммерсионных линз оно остается практически неизменным.

Временные aberrации определялись по разнице времени прихода в плоскость измерения осевого и крайних ионов. Плоскость измерения

находилась на расстоянии $100b$ от центра линзы, что примерно соответствует расстоянию от источника до детектора в современных времяпролетных масс-спектрометрах. Для характеристики временной aberrации введен параметр относительного временного отклонения R , который определяется формулой

$$R = \frac{t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}},$$

где t_{\min} — время прихода в плоскость измерения осевого электрона;

t_{\max} — время прихода в плоскость измерения крайнего в пучке электрона.

Зависимости относительного временного отклонения R от величины отношения сторон апертуры линзы и от размера расстояния между электродами приведены на рис. 3 и 4, соответственно.

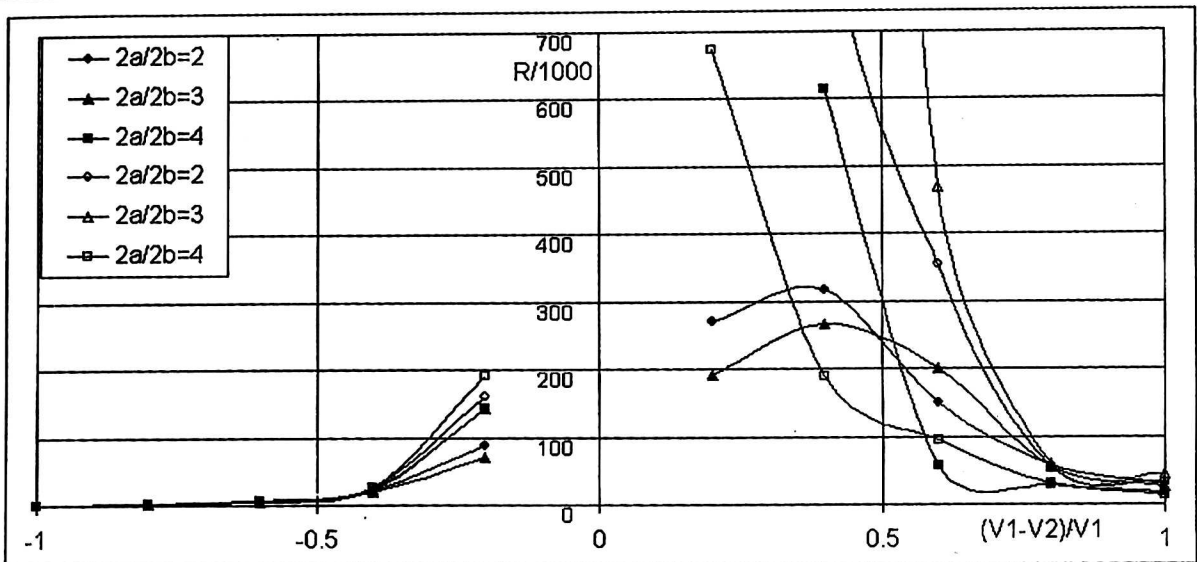


Рис. 3. Зависимость относительного временного отклонения R одиночных и иммерсионных линз с различными отношениями сторон апертуры $2a/2b$

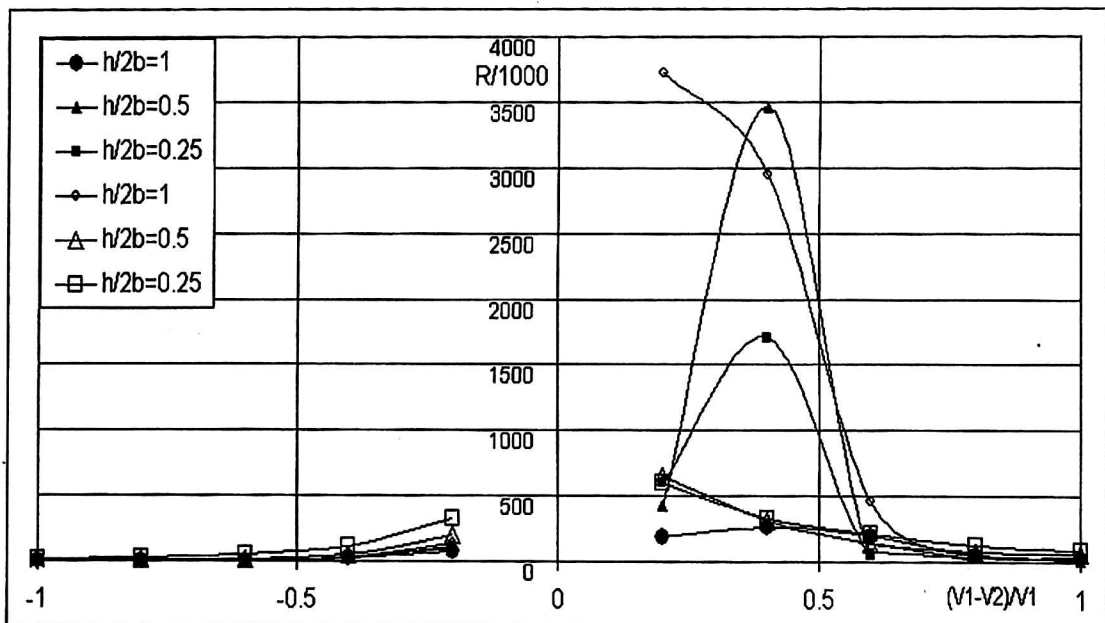


Рис. 4. Зависимость относительного временного отклонения R одиночных и иммерсионных линз с различными расстояниями между электродами h

Из представленных зависимостей видно, что при тормозящих режимах работы как для одиночных, так и для иммерсионных линз R практически не зависит от геометрических параметров этих линз. При ускоряющих потенциалах на линзе существуют режимы, близкие к режимам временной фокусировки, характеризующиеся наличием максимумов на кривых. Следует иметь в виду, что относительное временное отклонение R является интегральным параметром, характеризующим совокупное влияние на время пролета как собственно линзы, так и размера дрейфового пространства до плоскости измере-

ния из-за изменения продольной составляющей скорости иона.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности установки линзы в схему времяпролетного масс-спектрометра. Подбирая электрические и геометрические параметры линзы, можно добиться параллельности ленточного пучка в обеих плоскостях и временной фокусировки в плоскости детектора, что приводит к заметному увеличению чувствительности прибора при незначительном уменьшении его разрешения.

В дальнейшем планируется экспериментальная проверка выводов работы.

Авторы выражают благодарность
д-ру физ.-мат. наук М. И. Явору за внимание
к работе и ценные замечания.

Л и т е р а т у р а

1. Harting E., Read E. H. Electrostatic Lenses. — Amsterdam: Elsevier, 1976.
2. Баранова Л. А., Бубляев Р. А., Явор С. Я. //ЖТФ. 1987. Т. 57. № 3. С. 430—433.
3. Баранова Л. А., Бубляев Р. А., Явор С. Я. //Там же. 1990. Т. 60. № 2. С. 159—163.

Studying focusing and space-time features of the new type 3-D electrostatic lenses

R. A. Bublyayev, G. A. Galeev

Institute for Analytical Instrumentation, RAS, St.-Petersburg, Russia

L. A. Baranova

A. F. Ioffe Physical Technical Institute, RAS, St.-Petersburg, Russia

In the present work focusing and space-time features of different 3-D single and immerse electrostatic lenses have been under study. These lenses are formed by plane-parallel electrodes with rectangular apertures with the same orientation. All the calculations were made using the licensed SIMION 3D (version 7.0) software.