

一种超小型离子透镜设计

王苏徽, 沈令斌*, 田丽萍, 李嘉怡

金陵科技学院网络与通信工程学院 江苏南京

【摘要】利用电子光学仿真软件 CST 模拟设计了一种超小型光离子成像仪, 在仿真中采用单透镜聚焦系统对离子进行聚焦。同时, 模拟了离子在离子聚焦透镜中的飞行轨迹, 仿真分析了离子透镜的能量分辨率, 结果表明: 相同位置不同速度的离子在 MCP 处位于同一圆环, 相同速度不同位置的离子在 MCP 处汇聚于一点, 离子透镜的能量分辨率高于 4%, 满足光解动力学等应用领域离子速度成像仪对超小型离子透镜的应用需求。

【关键词】离子透镜; 单透镜聚焦系统; 速度分辨率; 能量分辨率

【基金项目】金陵科技学院 2024 年校级“科教融合”项目, 小型化离子速度成像仪电子光学结构设计, 项目编号: 2024KJRH22

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250277

A new design of small ion lens

Suhui Wang, Lingbin Shen*, Liping Tian, Jiayi Li

School of Network Communication Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】The design of a miniaturized optical ion imager was simulated using the electronic optical simulation software CST. In the simulation, a single lens focusing system was employed to concentrate the electrons. Additionally, the flight trajectories of ions within the ion focusing lens were simulated, and the velocity resolution and energy resolution of ion velocity imaging were analyzed. The results indicated that the energy resolution exceeds 4%, while the velocity resolution exceeds 2%. These findings meet the application requirements for miniaturized ion lenses in fields such as photodissociation dynamics.

【Keywords】Ion lens; Single-lens focusing system; Velocity resolution; Energy resolution

1 引言

以离子透镜和 MCP 位置敏感探测器为核心的离子成像技术, 能够将三维散射过程投影至二维平面进行成像, 消除离子初始位置空间分布对飞行时间和到达探测位置的影响, 分别实现时间聚焦和空间位置聚焦^[1-4]。1997 年, 荷兰奈梅亨大学的 A. Eppink 和 D. Parker 采用双场型结构, 将静电透镜引入了离子速度成像仪设计中, 完善了聚焦电场, 显著提升了离子的速度分辨率。2012 年, 中国科学院化学研究所 Guo-dong Zhang 设计了一款多极板离子透镜, 在 304 nm 波段实现了对 CH₃I 的解离成像, 但是离子透镜尺寸较大, 长度为 650 mm^[5]; 2016 年, 南京信息工程大学的刘玉柱设计了一种低电场电子成像仪, 采用具有一定电势差的四个极板, 降低了电极之间的电场强度, 但是整个成像仪的工作电压较高, 为 8000 V^[6]; 2021 年, 合肥工

业大学的张棋等研究了膜孔静电透镜系统在离子源中的应用, 分析了膜孔透镜数为 23 时, 单个膜孔透镜电压值对离子源影响较小, 但过多的透镜数目造成离子透镜焦点不易调节^[7]。

本文针对目前离子透镜存在的体积大、能量分辨率低等不足, 借助三维电磁设计了一款超小型离子透镜。为了提高离子透镜的速度聚焦能力, 采用单透镜静电聚焦系统作为离子自由漂移管, 增加了 3 个片状极板, 提升了电压的可调性; 为了提高能量分辨率和速度分辨率, 合理设计了电极结构及模型, 整个离子透镜实现了 4200 V 的低工作电压。本文的主要内容是超小型离子透镜三维结构设计、电磁场分布分析及性能指标评估。

2 离子透镜结构设计

2.1 几何结构设计

*通讯作者: 沈令斌

在三维电磁仿真软件中完成了离子透镜的建模, 如图 1(a)所示, 主要由推斥极 L1、引出极 L3、接地极 L7、自由飞行管(由 F1、F2 和 F3 构成)、及 MCP 探测器构成。自由飞行管采用单透镜静电聚焦系统, 单透镜的两端电极(F1 及 F3)具有相同的恒定电位, 中心电极 F2 的电位无论高低, 均对离子起汇聚作用^[8]。此外, 为减小离子透镜边缘场效应对离子运行速度的影响, 在模型中设计了 L4、L5 和 L6 极板, 增加了电压可调

节性, 能够提高离子透镜的探测精度。整个模型结构紧凑, 尺寸仅为 $\Phi 100\text{ mm} \times 272\text{ mm}$ 。图 1(b)为离子透镜沿光轴的电势分布曲线。

2.2 电压参数

确定了离子透镜的三维电磁模型结构后, 在各个电极上施加如表 1 所示的电压参数。利用电磁仿真软件求解离子透镜中的电磁场分布, 如图 2 所示。由离子源端至 MCP 探测屏, 电势逐渐降低, 对正离子起加速作用。

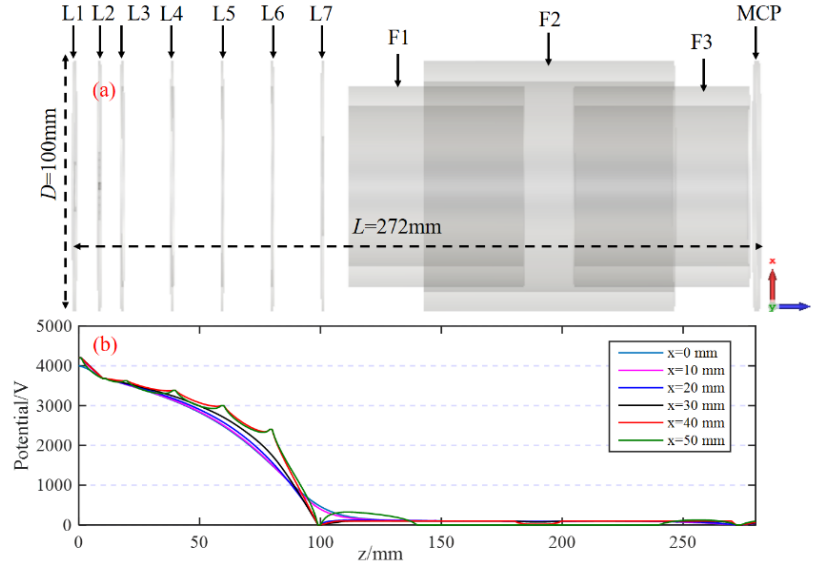


图 1 超小型离子透镜三维结构及电势分布图

表 1 超小型离子透镜各电极板电压参数

序号	电极板	电压/V	序号	电极板	电压/V
1	L1	4200	2	L2	3680
3	L3	3620	4	L4	3380
5	L5	3000	6	L6	2400
7	L7	0	8	F1	100
9	F2	3680	10	F3	100
11	F4	0			

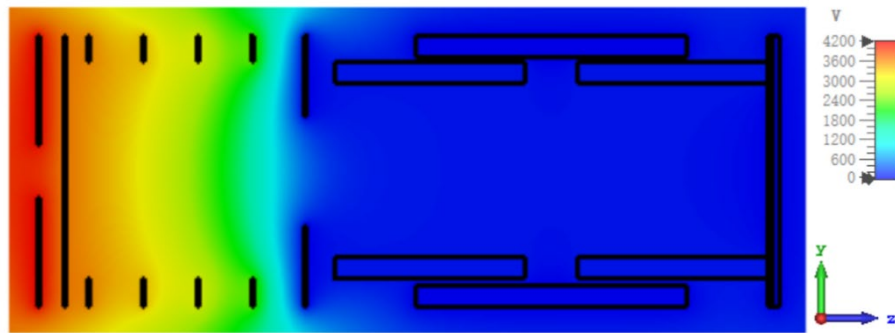


图 2 离子透镜沿 YOZ 平面的电势分布

3 离子透镜性能分析

3.1 离子轨迹分布图

为评估超小型离子透镜的速度成像能力, 在排斥极和引出极极板之间设置 8 个相同能量的离子源 (带正电的质子源), 8 个离子源的位置相同, 均位于光轴中心处, 速度分别沿 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 135^\circ$ 及 180° 八个方向, 如图 3(a) 所示。在三维电磁仿真软件中计算了离子透镜的电磁场分布之后, 根据洛伦兹力定律计算离子的运行轨迹。仿真中设置的离子源数目较少, 计算过程中忽略了空间电荷效应对离子轨迹的影响。离子透镜为旋转对称结构, 8 条离子轨迹也对称分布, 如图 4 所示。在 MCP 探测屏上统计 8 个离子的空间位置分布如图 3(b) 所示, 8 个离子在 MCP 处位于同一个圆环上。

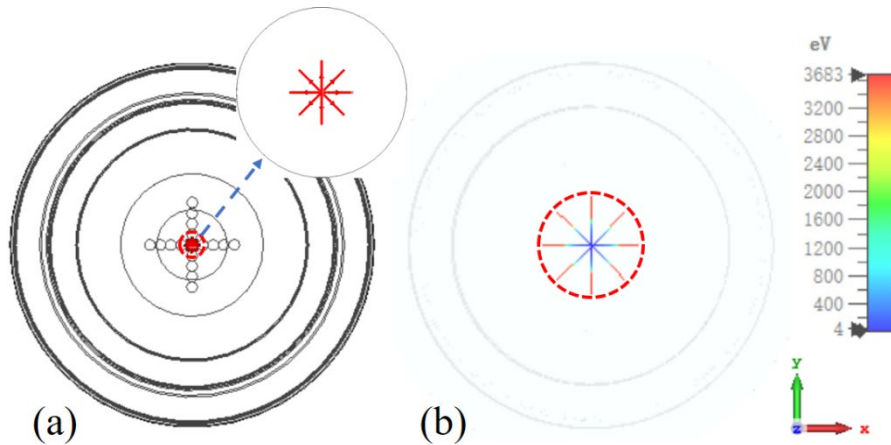
3.2 聚焦特性分析

在排斥极和引出极极板之间设置 5 个相同能量的

离子源 (带正电的质子源), 5 个离子源的速度相同, 位置不同, 分别位于 $x=1、2、3、4、5\text{ mm}$ 的位置处, 追踪离子轨迹, 如图 5 所示。可见, 离子源空间分布中 5 个具有相同速度的离子, 经过离子透镜之后能够汇聚于 MCP 探测屏上同一点处, 消除了初始位置对速度成像的影响。实际上聚焦后的成像点存在成像模糊, 即聚焦点存在一定的尺寸, (离子斑尺寸小于 $35\text{ }\mu\text{m}$)。

3.3 能量分辨率

离子能量分辨率定义为 $\Delta E/E=2\Delta r/r$, 其中 r 为离子成像半径, Δr 为成像半径的差值。仿真时选取了 2 个点, 分别计算了离子成像半径 r 、成像半径差值 Δr 能量分辨率和离子能量之间的关系, 如图 6 所示。离子能量越大, 能量分辨率越低, $1\text{ eV}\sim 4\text{ eV}$ 范围内, 离子透镜的能量分辨率优于 4%, 通常基于激光或同步辐射的离子成像分辨率在 2%~5%, 因此, 此设计的小型离子透镜可以满足基本实验需求。



(a) 离子源发射位置和方向; (b) 离子在 MCP 探测屏上的空间位置分布

图 3 相同位置不同速度发射的离子的轨迹图 (前视图)

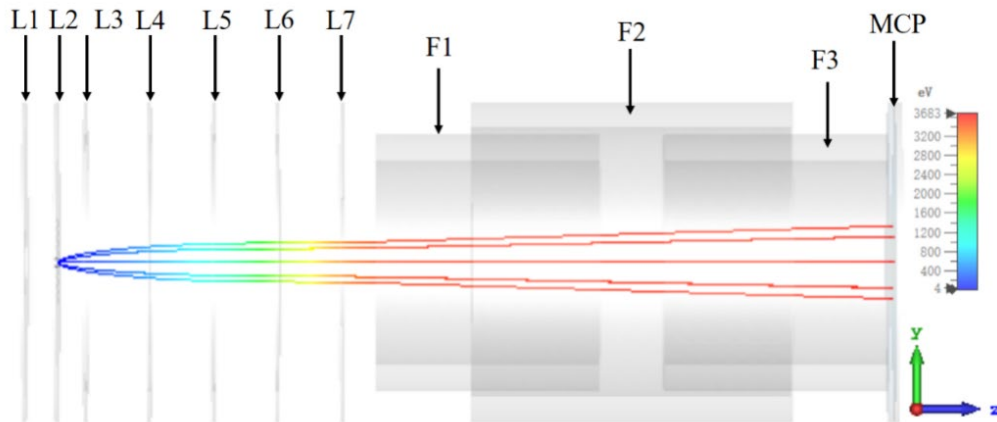


图 4 同一位置不同速度发射的离子的轨迹图示

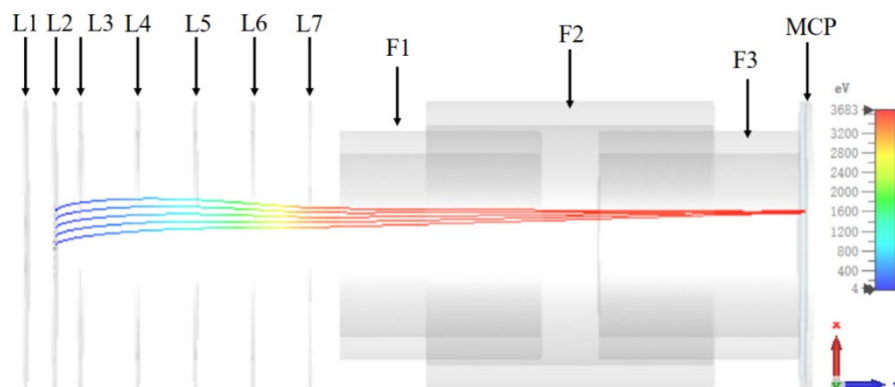


图5 相同速度不同位置发射的离子的轨迹图(侧视图)

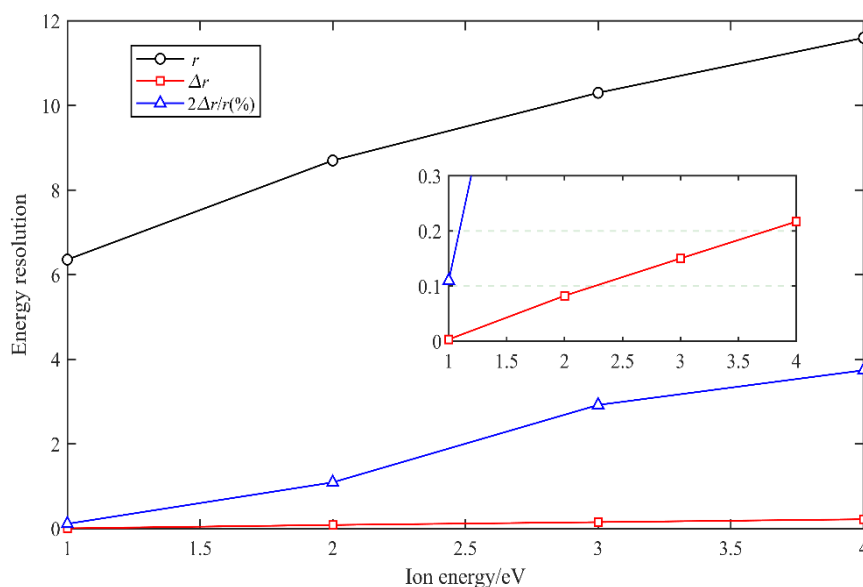


图6 不同能量离子的能量分辨率

4 结论

本文在三维电磁仿真软件中设计了一款超小型离子透镜系统, 利用离子轨迹追踪法对其性能指标进行了研究。分析了离子能量对离子成像半径及能量分辨率的影响; 演示了离子透镜的空间分辨特性。计算得出离子透镜的能量分辨率优于 4%, 相同位置不同速度发射的离子源在 MCP 探测屏处位于同一圆环上, 相同速度不同位置发射的离子源在 MCP 探测屏处汇聚于一点。本文所设计的具有高能量分辨率及空间分辨率的超小型离子透镜可用于离子速度成像系统, 实现对光解动力学、化学过程等实验中对离子动能和角度分布进行精确测量。

参考文献

- [1] 喻杰. 直流切片速度影像仪的研制及其在 CH₃Cl 强场解离中的应用[D]. 华中科技大学, 2023.
- [2] Mao R, Xiao H, Hu Y, et al. Photodissociation dynamics of dichlorodifluoromethane (CF₂Cl₂) around 235 nm using time-sliced velocity map imaging technology[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2019, 32(4): 406-410.
- [3] Yan Y-H, Liu Y-Z, Ding P-F, et al. Multiphoton ionization dissociation dynamics of iodoethane studied with velocity map imaging technique[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(20): 203301.
- [4] Li F-F, Ma Y-J, Liu J-X, et al. Photodissociation dynamics of AlO at 193 nm using time-sliced ion velocity imaging[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2020, 33(5): 649-652.

- [5] Zhang G-D, Guan L-C, Yan Z-F, et al. A three-dimensional velocity-map imaging setup designed for crossed ion-molecule scattering studies[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2021, 34(1): 71-80.
- [6] 刘玉柱,肖韶荣,夏俊荣,苏静,敖旷.一种低电场光电子成像仪:201610597107.8[P], 2018.04.13.
- [7] 张棋, 王国栋, 王进伟, 林云龙, 伊明辉, 李涛, 唐振宇. 小型离子源中膜孔静电透镜系统仿真研究[J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(1): 35-39.
- [8] Tian L, Shen L, Chen L, et al. A New Design of Large-format Streak Tube with Single-lens Focusing System[J]. Measurement Science Review, 2021, 21(6): 191-196.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

