

同轴反射式微型飞行时间质谱仪的研制

杨 栋, 刘瑞东, 吴向坤, 李 静, 侯可勇

(山东大学环境研究院, 山东 青岛 266237)

摘要: 在航天研究领域, 对化学成分检测存在快速、实时、便携的需求, 研发微型质谱仪以实现化学成分的快速分析是在线质谱研究的重要方向。本工作基于飞行时间质谱的原理与设计特点, 借助离子光学模拟软件 SIMION, 完成了基于同轴反射式微型飞行时间质量分析器及离子调制与传输装置的设计, 并对仪器的总体性能及相关影响因素进行优化。在模拟设计确定的仪器参数基础上, 成功研制出 1 台同轴反射式微型飞行时间质谱仪。该质谱仪重量 716 g、体积 187 cm³、功耗 76 W、最高分辨率达 44, 既满足了微型化和分辨率的要求, 同时具备检测铜、铁、铝、钛、镍等样品的能力, 具有重要的科研价值与现实意义。

关键词: 同轴反射式; 微型; 模拟; 质谱仪

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2026)03-0420-09

DOI: 10.7538/zpxb.2025.0149

CSTR: 32365.14.zpxb.2025.0149

Development of Coaxial Reflective Miniature Time-of-Flight Mass Spectrometer

YANG Dong, LIU Rui-dong, WU Xiang-kun, LI Jing, HOU Ke-yong

(Environment Research Institute of Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract: Due to the demands for speed, real-time performance and portability in the detection of chemical components in aerospace fields, developing a miniaturized mass spectrometer for rapid chemical analysis is one of the important directions in online mass spectrometry research. In this study, a coaxial reflection miniaturized time-of-flight mass analyzer, which consisted of an ionization region, accelerating region, lens region and microchannel plate region was first designed using SolidWorks software. The resulting model was then imported into SIMION, an ion optics simulation software, to simulate the ion trajectories. Based on the principle and design features of time-of-flight mass spectrometer, SIMION was used to optimize the overall performance and key influencing factors related to ion modulation and transmission. On the basis of determining the mechanical and electronic parameters of the instrument, a prototype of a coaxial reflection type miniaturized time-of-flight mass spectrometer was successfully developed. The mass spectrometer exhibited a weight of 716 g (without pump), a volume of 187 cm³, a power consumption of 76 W, and achieved a maximum mass resolution of 44, which satisfied the requirements for resolution and miniaturization. A 532 nm laser was employed as the ionization source, and the positively charged ions were accelerated by the

electric field with increasing voltage layer by layer. The accelerated ions were adjusted to change the flight direction by means of three-stage ion lenses, thereby achieving the coaxial reflection of the ions. Coaxial reflection involved that the ions are deflected within the field-free drift region, after which they pass through two reflection zones and coaxially return to the field-free flight area. This coaxial reflection effectively extended the flight distance of the ions and realized second-order spatial focusing. Finally, the ions impacted on the coaxially placed microchannel plate (MCP), and the electrons released by the MCP were captured by the anode plate. Furthermore, the mass spectrometer exhibited the capability of simultaneous detecting metallic samples such as copper, iron, aluminum, titanium and nickel. In summary, the developed coaxial reflection miniature time-of-flight mass spectrometer meets the requirements of light weight, small volume, low power consumption and high resolution, thus, it offers significant scientific research value and practical significance, especially for *in-situ* rapid chemical analysis in aerospace and other field-deployed scenarios.

Key words: coaxial reflective; miniature; simulation; mass spectrometer

随着人类对太空探索的不断深入,行星探测的核心任务^[1]包括寻找人类生存所必需的矿物质能源^[2-5]以及通过测定不同物种的同位素,用于揭示天体的起源以及挥发性成分的迁移过程^[6-7]。在这些研究目标的驱动下,质谱仪凭借其较宽的质量检测范围、较高的灵敏度,以及原位、快速、实时检测的优势,被越来越多地应用于太空飞行器着陆后的样本分析,尤其适用于有机化合物、无机化合物和同位素等物质的检测^[8-9]。因此,在过去的50年里,质谱仪已作为重要载荷搭载于苏联^[10]、美国国家航空航天局(NASA)^[6,11-12]和欧盟^[13]等航天机构发射的航天器,并广泛用于多项深空探测任务中。

从近50年发射和计划发射的航天器的质谱载荷可以看出,质谱仪普遍存在体积过大且重量过大的缺点,这一问题限制了航天器飞往更远天体的能力^[14]。例如,维京号(Viking)任务中的气相色谱-质谱仪(GC-MS)、用于表层土热解挥发性成分分析的飞行时间质谱仪(Vapors)、行星探索质谱仪(MASPEX)等能够测定很多无机物和有机物,但这类质谱仪存在重量偏大的问题^[6,15-17]。具体来说,Viking任务的GC-MS尺寸为33 cm×45.7 cm×33 cm,重量为25.4 kg^[6];Vapors尺寸为28 cm×18 cm×25 cm,重量为10 kg^[15];MASPEX的探测设备(Sensor)尺寸最大,为104.6 cm×43.5 cm×29.2 cm,总重量为64.8 kg^[16-17];即便是体积最小的Vapors,重量依然偏大。

多个研究团队在缩小质谱仪体积方面进行了积极探索,重点集中于缩小质量分析器的体积。在这方面,离子阱质谱(ITMS)具有独特优势,如“罗塞塔”号(Rosetta)搭载的Ptolemy离子阱质谱仪^[18],其尺寸仅为25 cm×33 cm×11 cm,重量仅为4.5 kg,功耗仅10 W;该仪器能够精确测量同位素比值,质量范围为12~150 u。四极杆质谱同样实现了小型化,如NASA于2011年发射的“好奇号”火星车(Curiosity Rover)搭载了1台四极杆质谱仪(QMS),体积为40 cm×30 cm×20 cm,重量为1.5 kg,功耗为15 W^[11];该QMS能够测量轻元素同位素和挥发性物质,质量范围为2~535 u,并成功证实了火星上存在氯苯及其类似的有机物^[19]。飞行时间质谱仪(TOF MS)的分辨率与其自身尺寸密切相关,因此其微型化面临较大挑战;而相比传统垂直加速反射器TOF MS体积大、重量大的设计,同轴反射器TOF MS的设计既能够缩小体积,又可以保证分辨率^[20-21]。在以上几种质量分析器中,离子阱质量分析器的缺点是难以测定小质量数物质,常需特殊处理;四极杆则存在质量歧视效应,需通过模式切换实现不同质量数区间的物质测量。因此,研究人员需根据实际需求选择合适的质量分析器。

质谱器件的微型化是实现整机微型化的前提。Riedo等^[22]研发的质谱仪采用一种高速微波传输带的多阳极多通道板探测器,该探测器系统轻巧、功耗低,其紧凑的结构适合集成到同轴反射式TOF MS系统中,使质谱仪整机体积缩小至

16 cm× ϕ 6 cm, 并成功对美国国家标准技术研究局所认证的参考物质(NIST SRM 665)中的 20 余种元素进行测定。Tulej 等^[23]研发的同轴反射式飞行时间质谱仪也实现了小型化设计, 最终集成为尺寸 40 cm×20 cm、重量 13 kg、平均功率 45 W 的仪器, 能够实现薄矿物层的同位素分析。这些研究表明, 通过对同轴反射式质量分析器、激光器以及微通道板等关键部件的一体化设计, 可有效减小 TOF MS 的系统体积。

同轴反射式 TOF MS 耦合激光剥蚀技术已被用于测定实验室模拟陨石样品中的元素与同位素, 如在 Riedo、Tulej、Brinckerhoff、Wiesendanger 等研究中, 成功实现了 Fe、Al 等几十种元素的定量测定^[22-25]。其中, Wiesendanger 等^[25]排除了受峰展宽影响的单谱数值, 将 Si、Ni、Cr 元素的测定精确度提高了 1.6~7.7 倍。此外, 作为 Luna-25 和 Luna-27 任务的有效载荷, LASMA-LR 激光电离质谱仪的尺寸缩小至 13 cm×20.6 cm×25.4 cm, 质量减至 2.8 kg, 平均功率低至 8 W; 该仪器成功测定了 MC146 合金中 W、Ti、Ta、Nb、Co、C 的比例, 100 张谱图的分析精度不低于 10%, 仅对丰度比超过 10:1 的同位素检测存在局限性^[26]。以上实验表明, 同轴反射器的设计在实现仪器小型化的同时, 仍能保证物质测定的准确性, 具备作为航天器质谱载荷的显著优势。

综上所述, 目前的技术发展对质谱仪提出了明确要求: 既要能够精确测定更多种类的有机与无机化合物、同位素、元素、分子结构和分子排列; 还需具备更小的体积、更轻的重量和更低的能耗, 以满足从月球到更遥远天体的原位探测。

本工作将通过离子光学模拟程序软件 SIMION 开展模拟研究, 研制 1 台同轴反射式微型飞行时间质谱仪, 以满足重量轻、体积小、功耗低、分辨率高的要求, 并对 Cu、Fe、Al、Ti、Ni 等样品进行检测, 希望为未来太空探索任务提供技术思路与支撑。

1 仪器主体与设计思路

同轴直线加速反射式 TOF MS 的结构设计示于图 1a。TOF MS 的电离源、加速器、反射器、探测器采用同轴设置, 点源产生的离子被加速后, 通过离子透镜进行角度发散, 发散后的离

子进入反射器经反射后到达探测器。本设计使用 532 nm 脉冲激光器(北京镭宝光电技术有限公司的 Lapa-80, 能量 ≥ 50 mJ, 频率 20 Hz, 脉宽 5.75 ns), 激光束经质谱腔体右侧透镜聚焦(图 1b), 从而对真空腔体内金属片样品实现电离。如图 1c 绿色线条所示, 金属受激光溅射失去 1 个电子形成分子离子(如 Fe 形成 Fe^+), 溅射出的金属正离子被逐层增加电压的加速电场加速; 加速后的离子通过 3 层离子透镜调整飞行方向, 实现离子同轴反射, 即离子经过无场飞行区偏转, 再经过一级和二级反射区实现同轴折返回到无场飞行区, 最终打在同轴放置的微通道板(MCP)上, MCP 释放的电子被接收板捕获并进行数据采集工作。

2 仪器模拟

2.1 仿真设计思路

离子到达检测器的时间差异主要源于各离子形成的精准时间和位置, 以及相对于探测器的各异初始速度矢量(即非均匀时间、空间和初始动能分布)。因此, 需在 SIMION 软件中建立模型对离子束轨迹进行仿真计算, 通过理论分析仪器的总体分辨率, 综合分析初始空间分散特性和初始离子位置, 依据仿真结果反复调整质谱各部分施加的电压, 直至达到理论最优结构及性能设计。

2.2 SIMION 仿真使用

利用 SIMION 软件进行电场与离子轨迹的仿真。首先, 在 SolidWorks 中建立机械结构模型并导入 SIMION, 继而在 SIMION 中构建质量分析器的离子光学系统, 以进行后续的仿真优化; 将生成的电极几何转换为 SIMION 可处理的电极文件(.PA0 格式文件)。随后, 在 Workbench 中加载并装配各子系统的电极文件, 得到离子光学运行文件(.iob 格式文件); 分别加载控制文件(.lua 格式文件)和离子初始条件文件(.fly 格式文件)后, 即可对所建光学系统进行仿真计算。最后, 将结果输出为实时图形或保存为文档。

2.3 SIMION 仿真结果

SIMION 软件离子设置列于表 1, 其三维(3D)空间及 X-Y 平面的偏转角度示意图示于图 2a。统计结果表明, 2 000 个离子中有 1 764 个离子可到达探测器底板, 离子利用率为 88%。对这

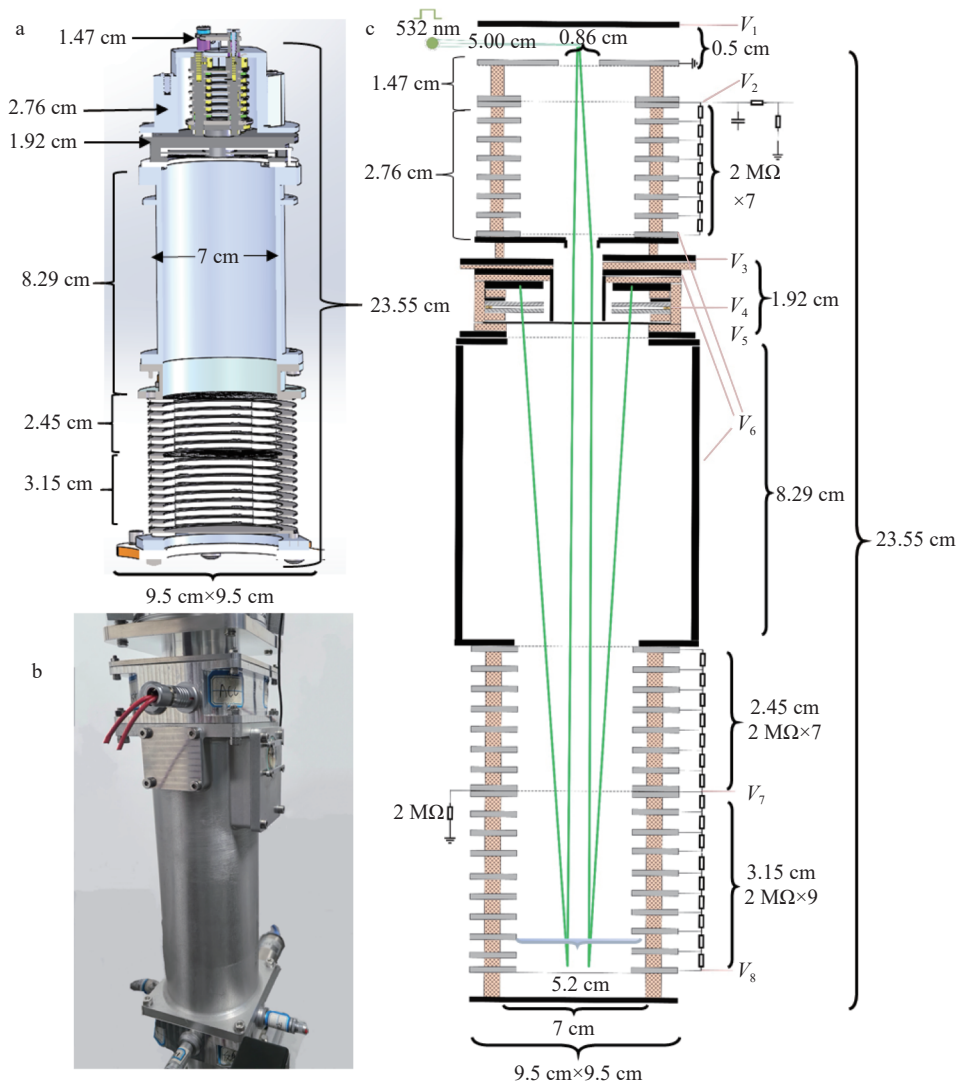


图1 质谱腔体剖面图(a),实物图(b)和电路示意图(c)

Fig. 1 Cross-sectional view (a), physical photograph (b), and circuit schematic diagram (c) of the mass spectrometer chamber

部分离子的飞行时间进行频数分布统计与高斯拟合,结果示于图3。质荷比(m/z)设置为59时,飞行时间为6.25 μs ,半峰宽最大值为0.05 μs ,理论分辨率(R)为110。

3 仪器设计

根据SIMION仿真结果,对仪器各部件的结构及施加电压参数进行优化,结果列于表1。改进后的仪器总长度为23.55 cm,两端采用9.50 cm \times 9.50 cm的方形结构,中间为内径7.00 cm的圆筒腔体。

3.1 离子偏转设计

质谱的核心设计在于离子偏转结构,即通过

在中间区域施加三透镜电压以实现离子偏转,并与探测器集成,该偏转区域长度为1.92 cm。激光点源产生的离子经电场加速后,在三透镜系统中以与轴向呈 3° 的初始角度发生发散,发散后的离子进入反射镜处,以 42° 的发散角度被反射。三透镜电压包括加速区底部电位 V_6 为-1 560 V、探测器结合部分金属底座电位 V_3 为-700 V、探测器底座电位 V_0 为-1 560 V,示于图2b。上述三透镜电压的选取决定了离子初始偏转 3° 发散角度的形成,其有效性得到SIMION仿真与实验的确认。探测器整体与加速器和飞行筒连接的部分包括金属底座电位(V_3)、探测器底座电位、阳极接收板电位(V_0)、MCP输出电位

表1 SIMION 软件离子参数
Table 1 Parameters of ions in SIMION software

项目 Item	参数 Parameter	数值 Value
飞行离子的基本参数设置	输入离子数	2000
	质荷比(m/z)	59
	离子源方位	中心坐标(33, 70, 36.2), 坐标轴(33, 70, 36.2), 中心直径0.1 cm, 长度0.1 cm
	离子方向矢量	(0, -1, 0)
	动能/eV	0.5
SIMION模拟的电压数值加电方案	V_1 (接地电位)/V	0
	V_2 (加速区入口电位)/V	-195
	Poffset(偏置电位)/V	25
	V_3 (金属底座电位)/V	-700
	V_4 (MCP输出电位)/V	-100
	V_5 (MCP输入电位)/V	-2030
	V_6 (阳极接收板电位)/V	0
	V_6 (加速区底部电位、探测器底座电位、无场飞行区电位)/V	-1560
V_7 (反射1区电位)/V	-300	
V_8 (反射2区电位)/V	1750	

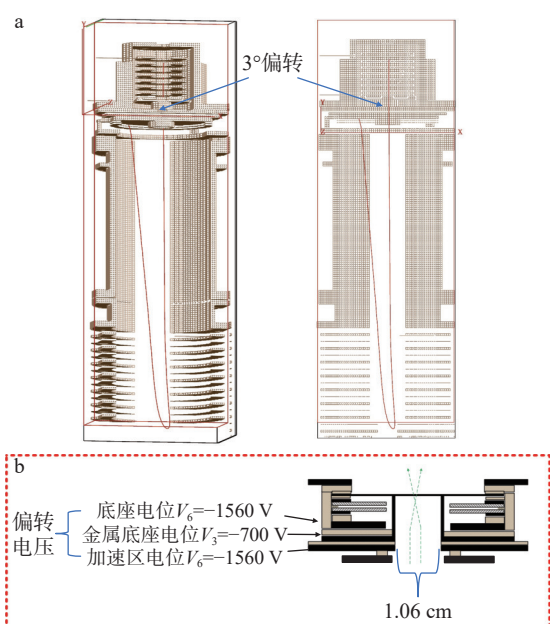


图2 SIMION 模拟偏转角度示意图(a)和探测器连接部分(b)

Fig. 2 SIMION simulated on schematic diagram of deflection angle (a) and connection part of detector (b)

(V_4)、MCP 输入电位(V_5)、无场飞行区电位(V_6)等多路电压, 结合部分总长度 1.92 cm。其中, 探

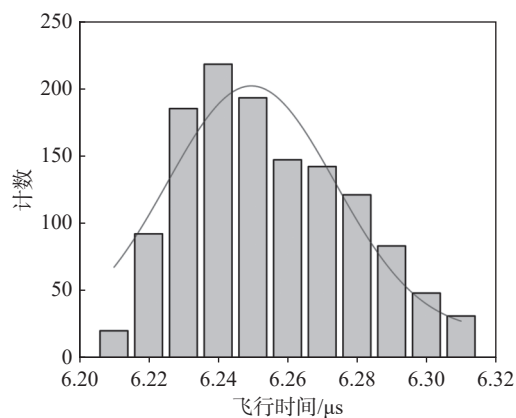


图3 高斯拟合

Fig. 3 Gaussian fitting

测器的栅网与探测器的底座连接, 因此同为 V_6 电位; MCP 主体由 MCP 输出、MCP 输入和阳极接收板三部分组成; 探测器端盖与无场飞行区(即飞行筒)相连, 从而同为 V_6 电位; 最终探测器被成功集成到质谱系统中。

3.2 同轴反射式设计

质量分析器是质谱仪的核心部件之一, TOF 质量分析器借助电场作用, 根据不同 m/z 离子飞行时间的差异, 实现离子的区分与分离。利用同

轴反射式 TOF MS 结构可有效延长离子飞行距离, 实现二阶空间聚焦, 进而保障 TOF MS 的分辨率。经传输系统偏转后的离子, 首先进入约 $-1\ 560\ \text{V}$ 电压构建的 $8.29\ \text{cm}$ 飞行区, 在此过程中逐渐增大偏移方位; 随后依次通过 2.45 、 $3.15\ \text{cm}$ 长的两级反射区, 进一步在减速过程中扩大偏移方位; 之后离子折返, 再次穿过两级反射区和飞行区; 最后到达信号接收板阳极完成检测。

3.3 其他部件设计

MCP 后接的大尺寸阳极(内孔 $5\ \text{mm}$ 、外径 $36\ \text{mm}$)可提供更大的离子接收面积, 使数据测定具备更窄的脉冲时间宽度, 从而提高数据测量的时间分辨率。MCP 的应用使质谱仪结构更紧凑, 2 片 MCP 之间施加超 $1\ 930\ \text{V}$ 的电压差 ($-2\ 030\ \text{V}$ 和 $-100\ \text{V}$), 可实现 10^7 级的增益, 即能将 nA 级电流信号放大至 mA 级, 最终被示波器检测。实验过程中, 通过 DG645 控制激光器触发和示波器触发的频率和时序一致, 采样周期设置为 $50\ \mu\text{s}$; 真空系统由 $80\ \text{L/s}$ 分子泵和 $5\ \text{L/min}$ 机械泵协同实现 $1 \times 10^{-4}\ \text{Pa}$ 的真空度, 以维持质谱仪运行; 电学系统主要包括主控板、真空计板、MCC 电源板等模块。

4 结果与讨论

4.1 仪器评估

本仪器在不包含电控系统的情况下, 选用常规 7079 铝合金、聚醚醚酮(PEEK)件、钛合金螺钉及电阻时, 质谱真空腔体质量为 $563\ \text{g}$, 其余部件质量为 $555\ \text{g}$, 总质量为 $1\ 118\ \text{g}$; 若选用镁铝合金、PEEK 和钛合金进行加工, 则总质量预计可降至 $716\ \text{g}$ 。经计算, 质谱腔体的体积为 $187\ \text{cm}^3$ 。通过功率计测试, 仪器在样品测定过程中的功耗为 $76\ \text{W}$ 。

4.2 实验结果与讨论

本研究对设计的激光电离同轴反射式 TOF 质量分析器进行测试, 选取铜片 ($m/z\ 64$)、铁片 ($m/z\ 56$)、铝片 ($m/z\ 27$)、钛片 ($m/z\ 48$)、镍片 ($m/z\ 59$) 作为待测样品, 测得其出峰时间分别为 6.5 、 6.0 、 4.2 、 5.5 、 $6.2\ \mu\text{s}$ 。从采样周期 $50\ \mu\text{s}$ 计算, 质量范围为 $1 \sim 100\ \text{u}$ 。质谱峰经质量轴校正后, 获得 5 种金属的电压值- m/z 散点图; 对离子峰型进行高斯拟合后, 获得 5 种物质的电压值- m/z 拟合曲线, 示于图 4。实验测得铜、铁、铝、钛、镍的电压强度峰值分别为 0.16 、 4.40 、 15.30 、 3.04 、 $4.90\ \text{V}$, 其中激光对铝的电离效果最佳, 可能是由于不同金属材料吸收的激光能量不同。通过

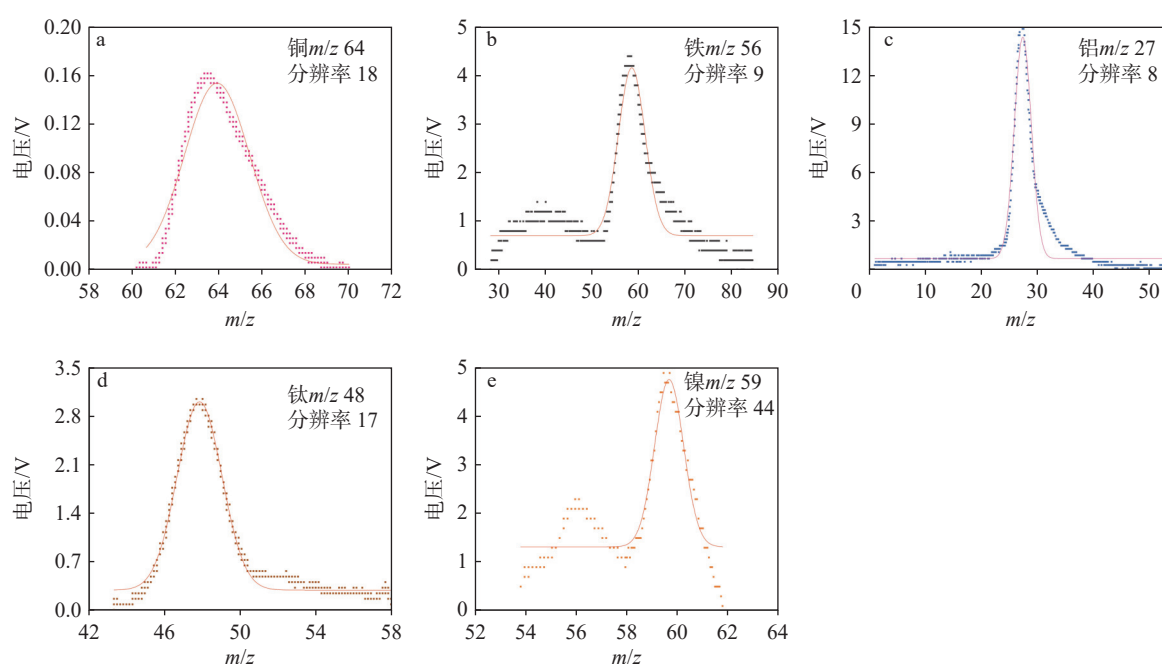


图 4 高斯拟合前后, 激光电离铜片(a)、铁片(b)、铝片(c)、钛片(d)、镍片(e)的电压变化

Fig. 4 Voltage variations of laser-ionized copper (a), iron (b), aluminum (c), titanium (d) and nickel (e) before and after Gaussian fitting

换算公式 $m/z = -0.59T^2 + 22.39T - 56.67$ (m/z 为对应质荷比; T 为质谱出峰时间, 单位为 μs) 计算可得, 该质谱仪在 m/z 59(镍) 处的质量分辨率达 44; 钛离子峰高斯拟合效果最佳, 决定系数 (R^2) 为 0.98。实验测定的分辨率较 SIMION 仿真结果有所降低, 可能原因为: 1) 激光生成的点源在经透镜聚焦后, 激光光斑仍有较大的焦点, 大于 SIMION 预设的离子初始发射点尺寸, 导致形成初始误差; 2) 信号屏蔽效果存在优化空间; 3) 机械加工和装配本身会造成一定的误差; 4) 电控提供给电脑的回读电压值本身存在一定的误差, 实际电压参数和仿真电压参数不完全一致。

5 结论

本研究成功研制了 1 台重量 716 g、体积 187 cm^3 、功耗 76 W、质量分辨率最高可达 44、质量数范围为 $1\sim 100\text{ u}$ 的同轴反射式微型飞行时间质谱仪, 并对仪器的各项性能进行了优化。采用激光溅射电离源分析不同金属, 发现相较于其他质谱仪, 该仪器具有体积较小、重量轻、功耗低的优势, 且质量分辨率能够满足常规检测。尽管该同轴反射式微型飞行时间质谱仪的性能仍有待提升, 但已初步实现从理论设计到实际应用的跨越, 达到预期的阶段性目标。后续研究将围绕灵敏度和分辨率的提升开展优化工作, 以期对深空探测任务提供更多的技术支持。

参考文献:

- [1] NASA's Opportunity Rover Mission on Mars Comes to End[EB/OL]. [2019-02-13]. <https://science.nasa.gov/missions/mer/nasas-opportunity-rover-mission-on-mars-comes-to-end>.
- [2] REN Z, GUO M, CHENG Y, WANG Y, SUN W, ZHANG H, DONG M, LI G. A review of the development and application of space miniature mass spectrometers[J]. Vacuum, 2018, 155: 108-117.
- [3] HU S, HE H, JI J, LIN Y, HUI H, ANAND M, TARTÈSE R, YAN Y, HAO J, LI R, GU L, GUO Q, HE H, OUYANG Z. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5[J]. Nature, 2021, 600(7 887): 49-53.
- [4] HUI H, PESLIER A H, ZHANG Y, NEAL C R. Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(3): 177-180.
- [5] 惠鹤九. 月球内部水的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(5): 706-713, 696.
HUI Hejiu. Water in the lunar interior: a review[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(5): 706-713, 696(in Chinese).
- [6] BIEMANN K, OWEN T, RUSHNECK D R, LaFLEUR A L, HOWARTH D W. The atmosphere of Mars near the surface: isotope ratios and upper limits on noble gases[J]. Science, 1976, 194(4 260): 76-78.
- [7] LESHIN L A, MAHAFFY P R, WEBSTER C R, CABANE M, COLL P, CONRAD P G, ARCHER JR P D, ATREYA S K, BRUNNER A E, BUCH A, EIGENBRODE J L, FLESCHE G J, FRANZ H B, FREISSINET C, GLAVIN D P, MCADAM A C, MILLER K E, MING D W, MORRIS R V, NAVARRO-GONZÁLEZ Z R, NILES P B, OWEN T, PEPIN R O, SQUYRES S, STEELE A, STERN J C, SUMMONS R E, SUMNER D Y, SUTTER B, SZOPA C, TEINTURIER S, TRAINER M G, WRAY J J, GROTZINGER J P, MSL SCIENCE TEAM. Volatile, isotope, and organic analysis of Martian fines with the Mars Curiosity Rover[J]. Science, 2013, DOI: [10.1126/science.1238937](https://doi.org/10.1126/science.1238937).
- [8] PALMER P T, LIMERO T F. Mass spectrometry in the U. S. space program: past, present, and future[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2001, 12(6): 656-675.
- [9] GOESMANN F, BRINCKERHOFF W B, RAULIN F, GOETZ W, DANELL R M, GETTY S A, SILJESTRÖM S, MIBBACH H, STEININGER H, AREVALO R D Jr, BUCH A, FREISSINET C, GRUBISIC A, MEIERHENRICH U J, PINNICK V T, STALPORT F, SZOPA C, VAGO J L, LINDNER R, SCHULTE M D, BRUCATO J R, GLAVIN D P, GRAND N, LI X, van AMEROM F H W. The Mars organic molecule analyzer (MOMA) instrument: characterization of organic material in Martian sediments[J]. Astrobiology, 2017, 17(6/7): 655-685.
- [10] GRARD R, PEDERSEN A, KLIMOV S, SAVIN S, SKALSKY A, TROTIGNON J G, KENNEL C. First measurements of plasma waves near Mars[J]. Nature, 1989, 341(6 243): 607-609.
- [11] MAHAFFY P R, WEBSTER C R, CABANE M, CONRAD P G, COLL P, ATREYA S K, ARVEY R, BARCINIAC M, BENNA M, BLEACHER L, BRINCKERHOFF W B, EIGENBRODE J L, CARIGNAN D, CASCIA M, CHALMERS R A, DWORKIN J P, ERRIGO T, EVERSON P, FRANZ H, FARLEY R, FENG S, FRAZIER G, FREISSINET C, GLAVIN D P,

- HARPOLD D N, HAWK D, HOLMES V, JOHNSON C S, JONES A, JORDAN P, KELLOGG J, LEWIS J, LYNESS E, MALESPIN C A, MARTIN D K, MAURER J, McADAM A C, McLENNAN D, NOLAN T J, NORIEGA M, PAVLOV A A, PRATS B, RAAEN E, SHEINMAN O, SHEPPARD D, SMITH J, STERN J C, TAN F, TRAINER M, MING D W, MORRIS R V, JONES J, GUNDERSEN C, STEELE A, WRAY J, BOTTA O, LESHIN L A, OWEN T, BATTEL S, JAKOSKY B M, MANNING H, SQUYRES S, NAVARRO-GONZÁLEZ R, McKAY C P, RAULIN F, STERNBERG R, BUCH A, SORENSEN P, KLINE-SCHODER R, COSCIA D, SZOPA C, TEINTURIER S, BAFFES C, FELDMAN J, FLESCH G, FOROUHAR S, GARCIA R, KEYMEULEN D, WOODWARD S, BLOCK B P, ARNETT K, MILLER R, EDMONSON C, GOREVAN S, MUMM E. The sample analysis at Mars investigation and instrument suite[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1): 401-478.
- [12] EIGENBRODE J L, SUMMONS R E, STEELE A, FREISSINET C, MILLAN M, NAVARRO-GONZÁLEZ R, SUTTER B, McADAM A C, FRANZ H B, GLAVIN D P, ARCHER P D Jr, MAHAFFY P R, CONRAD P G, HUROWITZ J A, GROTZINGER J P, GUPTA S, MING D W, SUMNER D Y, SZOPA C, MALESPIN C, BUCH A, COLL P. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars[J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1096-1101.
- [13] BALSIGER H, ALTWEGG K, BOCHSLER P, EBERHARDT P, FISCHER J, GRAF S, JÄCKEL A, KOPP E, LANGER U, MILDNER M, MÜLLER J, RIESEN T, RUBIN M, SCHERER S, WURZ P, WÜTHRICH S, ARIJS E, DELANOYE S, de KEYSER J, NEEFS E, NEVEJANS D, RÈME H, Aoustin C, MAZELLE C, MÉDALE J L, SAUVAUD J A, BERTHELIER J J, BERTAUX J L, DUVET L, ILLIANO J M, FUSELIER S A, GHIEMMETTI A G, MAGONCELLI T, SHELLEY E G, KORTH A, HEERLEIN K, LAUCHE H, LIVI S, LOOSE A, MALL U, WILKEN B, GLIEM F, FIETHE B, GOMBOSI T I, BLOCK B, CARIGNAN G R, FISK L A, WAITE J H, YOUNG D T, WOLLNIK H. Rosina-Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128(1): 745-801.
- [14] AREVALO R J, NI Z, DANELL R M. Mass spectrometry and planetary exploration: a brief review and future projection[J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2020, 55(1): e4454.
- [15] GETTY S A, TEN KATE I L, FENG S H, BRINCKERHOFF W B, CARDIFF E H, HOLMES V E, KING T T, LI M J, MUMM E, MAHAFFY P R, GLAVIN D P. Development of an evolved gas-time-of-flight mass spectrometer for the volatile analysis by pyrolysis of regolith (VAPoR) instrument[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2010, 295(3): 124-132.
- [16] BROCKWELL T G, MEECH K J, PICKENS K, WAITE J H, MILLER G, ROBERTS J, LUNINE J I, WILSON P. The mass spectrometer for planetary exploration (MASPEX)[C]//2016 IEEE Aerospace Conference. March 5-12, 2016, Big Sky, MT, USA. IEEE, 2016: 1-17.
- [17] WAITE J H, BURCH J L, BROCKWELL T G, YOUNG D T, MILLER G P, PERSYN S C, STONE J M, WILSON P, MILLER K E, GLEIN C R, PERRYMAN R S, McGRATH M A, BOLTON S J, McKINNON W B, MOUSIS O, SEPHTON M A, SHOCK E L, CHOUKROUN M, TEOLIS B D, WYRICK D Y, ZOLOTOV M Y, RAY C, MAGONCELLI A L, RAF-FANTI R R, THORPE R L, BOUQUET A, SALTER T L, ROBINSON K J, URDIALES C, TYLER Y D, DIRKS G J, BEEBE C R, FUGETT D A, ALEXANDER J A, HANLEY J J, MOORHEAD-ROSENBERG Z A, FRANKE K A, PICKENS K S, FOCIA R J, MAGEE B A, HOEPER P J, AARON D P, THOMPSON S L, PERSSON K B, BLASE R C, DUNN G F, KILLOUGH R L, DELOS SANTOS A, RICKERSON R J, SIEGMUND O H W. MASPEX-Europa: the Europa clipper neutral gas mass spectrometer investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2024, 220(3): 30.
- [18] WRIGHT I P, BARBER S J, MORGAN G H, MORSE A D, SHERIDAN S, ANDREWS D J, MAYNARD J, YAU D, EVANS S T, LEESE M R, ZARNECKI J C, KENT B J, WALTHAM N R, WHALLEY M S, HEYS S, DRUMMOND D L, EDESON R L, SAWYER E C, TURNER R F, PILLINGER C T. Ptolemy-an instrument to measure stable isotopic ratios of key volatiles on a cometary nucleus[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128(1): 363-381.
- [19] FREISSINET C, GLAVIN D P, MAHAFFY P R, MILLER K E, EIGENBRODE J L, SUMMONS R E, BRUNNER A E, BUCH A, SZOPA C, ARCHER P D, FRANZ H B, ATREYA S K, BRINCKERHOFF W B, CABANE M, COLL P, CONRAD P G, des MARAIS D J, DWORKIN J P, FAIRÉN A G, FRANÇOIS P, GROTZINGER J P, KASHYAP S, TEN KATE I L,

- LESHIN L A, MALESPIN C A, MARTIN M G, MARTIN-TORRES F J, McADAM A C, MING D W, NAVARRO-GONZÁLEZ R, PAVLOV A A, PRATS B D, SQUYRES S W, STEELE A, STERN J C, SUMNER D Y, SUTTER B, ZORZANO M P, The MSL Science Team. Organic molecules in the sheepbed mudstone, gale crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(3): 495-514.
- [20] MAMYRIN B A, KARATAEV V I, SHMIKK D V, ZAGULIN V A. The mass-reflectron, a new nonmagnetic time-of-flight mass spectrometer with high resolution[J]. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1973, 37: 45-48.
- [21] KARAS M, HILLENKAMP F. Laser desorption ionization of proteins with molecular masses exceeding 10, 000 daltons[J]. *Analytical Chemistry*, 1988, 60(20): 2 299-2 301.
- [22] RIEDO A, TULEJ M, ROHNER U, WURZ P. High-speed microstrip multi-anode multichannel plate detector system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(4): 045114.
- [23] TULEJ M, SCHMIDT P K, GRUCHOLA S, de KONING C P, KIPFER K A, BOEREN N J, LIGTERINK N F W, RIEDO A, WURZ P. Towards *in-situ* geochemical analysis of planetary rocks and soils by laser ablation/ionisation time-of-flight mass spectrometry[J]. *Universe*, 2022, 8(8): 410.
- [24] BRINCKERHOFF W B, CORNISH T J, McENTIRE R W, CHENG A F, BENSON R C. Miniature time-of-flight mass spectrometers for *in situ* composition studies[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52(2/3/4/5/6): 397-404.
- [25] WIESENDANGER R, TULEJ M, GRIMAUDO V, CEDEÑO-LÓPEZ A, LUKMANOV R, RIEDO A, WURZ P. A method for improvement of mass resolution and isotope accuracy for laser ablation time-of-flight mass spectrometers[J]. *Journal of Chemometrics*, 2019, 33(1): e3081.
- [26] CHUMIKOV A E, CHEPTSOV V S, WURZ P, LASI D, JOST J, MANAGADZE N G. Design, characteristics and scientific tasks of the LASMA-LR laser ionization mass spectrometer onboard Luna-25 and Luna-27 space missions[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2021, 469: 116 676.

(收稿日期: 2025-11-18; 修回日期: 2025-12-13)