

新型飞行时间质谱离子移除装置的研制

麦泽彬^{1,2}, 苏海波², 谭国斌^{1,2}, 霍 蕾¹, 李 磊^{1,3},
黄正旭^{1,3}, 高 伟^{1,3}, 周 振^{1,3}

(1. 暨南大学质谱仪器与大气环境研究所, 广东 广州 510632;

2. 广州禾信仪器股份有限公司, 广东 广州 510530;

3. 广东省大气污染在线源解析系统工程技术研究中心, 广东 广州 510632)

摘要:本文介绍了一种用于飞行时间质谱离子检测器选择性移除非目标检测离子的脉冲电场装置。通过调节脉冲电压时序、优化脉冲电压值, 实现对非目标检测离子的有效移除, 使离子选择性地进入离子检测器, 减少离子检测器的消耗, 延长其使用寿命。结果表明, 除了由脉冲上升沿和下降沿引起的质谱信号振荡对相邻飞行时间区域内的离子产生一定的影响外, 该装置和方法可以选择性地、有效地移除非目标检测离子, 以减少 MCP 离子检测器的消耗, 延长其使用寿命, 为飞行时间质谱非目标离子的移除提供一种简单、可行的方法。

关键词: 飞行时间质谱(TOF MS); 检测器; 推移脉冲; 离子移除

中图分类号: O657. 63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2019)02-0189-08

doi: 10. 7538/zpzb. 2018. 0047

Development of Ion Removal Device for Time-of-Flight Mass Spectrometry

MAI Ze-bin^{1,2}, SU Hai-bo², TAN Guo-bin^{1,2}, HUO Lei¹, LI Lei^{1,3},
HUANG Zheng-xu^{1,3}, GAO Wei^{1,3}, ZHOU Zhen^{1,3}

(1. *Institute of Mass Spectrometer and Atmospheric Environment, Ji'nan University,*

Guangzhou 510632, China; 2. *Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou 510530, China;*

3. *Guangdong Provincial Engineering Research Center for On-line Source Apportionment System of Air Pollution, Guangzhou 510632, China*)

Abstract: A pulsed electric field device for selective removal of target ions at the front of the ion detector for a time-of-flight mass spectrometer was introduced. The pulsed electric field device had three grid meshes: MCP grid mesh, pulse grid mesh and ACCE grid mesh. The effective removal of the non-target ions was achieved by adjusting the pulse voltage and its width on pulse grid mesh to impede the non-target ions reaching the ion

收稿日期: 2018-05-04; 修回日期: 2018-08-10

基金项目: 2016 年产学研协同创新重大专项校地协同(201604040007); 2016 广州市产学研协同创新重大专项产业技术研究(201604010065); 广州市产学研协同创新重大专项(2016201604030010)资助

作者简介: 麦泽彬(1987—), 男(汉族), 广东人, 硕士研究生, 环境工程专业。E-mail: 351181418@qq.com

通信作者: 高 伟(1982—), 男(汉族), 河北人, 副研究员, 从事质谱仪器的开发及应用研究。E-mail: gaowei_2@163.com

网络出版时间: 2018-11-27; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2979.TH.20181123.1503.008.html>

detector, in order to reduce the consumption of ion detector and prolong the life time of the ion detector. The experimental results showed that the pulsed electric field device could remove one or more interval ions through changing pulse voltage to adjust the removal rate and changing pulse width to adjust the removal span range. Except for spectral signal oscillations caused by the rising and falling edges of the pulse for neighbor ions, the device could effectively remove the non-target ions, and kept the other target ions stable. This specific ion removal method can provide an easy way to improve the existing TOF MS instruments.

Key words: ion detector; removal pulse; ion selection; time-of-flight mass spectrometry

飞行时间质谱(time-of-flight mass spectrometry, TOF MS)是常用的质谱仪器之一,具有机械结构简单、检测质量范围宽、分析速度快等优点,目前已广泛应用于环境、大气、医学等领域的快速检测中,且在全二维气相色谱-质谱联用仪中只能选择 TOF MS 作为质量分析器^[1-3]。目前,微通道板(micro channel plate, MCP)作为 TOF MS 常用的离子检测器,通过离子的电子倍增实现对样品的有效检测,其材质和原理决定了 MCP 具有一定的工作寿命,单位时间内进入 MCP 的离子量越多, MCP 消耗越快,尤其对于一些强信号离子更是如此^[4]。

在飞行时间质谱分析过程中经常产生一些非目标离子,如在气相色谱-质谱联用检测中产生大量的载气离子,质子转移反应质谱中产生大量的 H_3O^+ 或其他初始反应离子等^[5],这些非目标离子一方面会增加 MCP 的消耗,缩短其寿命;另一方面,离子强度较大的非目标离子会影响附近强度较弱的目标离子,降低检测灵敏度。

目前常用的去除非目标离子的方式有离子源中去除和质量分析器中去除。离子源中去除是在离子源及离子传输系统中进行,一般采用抑制分子电离或利用电场或磁场分离离子的方法。离子源中去除一般仅限于去除一种离子,且结构复杂。质量分析器中去除通常包括在无场飞行区安装偏转板,或是在反射式飞行时间质谱中的反射板上施加脉冲电场两种方式。其中,偏转板的电场容易影响到无场区的其他离子,造成干扰;而在反射板施加脉冲电场的方式仅限于在反射式飞行时间质谱中使用^[6-10]。

本工作拟研制一种安装在飞行时间质谱离

子检测器前端的脉冲电场装置,当非目标离子飞行接近离子检测器时,通过施加脉冲电场使其偏离原运动轨迹从而不被离子检测器接收。希望通过单脉冲或多脉冲的形式设置不同的延时、脉宽,实现选择性地移除某种或某几种非目标离子。

1 仪器原理及结构

1.1 仪器及装置结构

飞行时间质量分析器主要由加速区、无场飞行区、反射区和 MCP 离子检测器组成^[11-14],装置整体示意图示于图 1。本实验在 MCP 检测器前端增加了一个脉冲电场装置,该装置是由 MCP 栅网(Grid1, G1)、脉冲栅网(Grid2, G2)、无场区 ACCE 栅网(Grid3, G3)组成,对 G2 施加单脉冲电压或多段脉冲电压可实现某段或多段离子的移除。

离子推移脉冲系统由一个带有同步延时可调输出的函数发生器、高压脉冲板及相关电路组成。以 Trigger 为触发,离子引入高压脉冲与离子推移脉冲同步发生,中间有一定的延时,时序示于图 2。离子引入高压脉冲将离子引入 TOF MS 中飞行,根据目标离子飞行至 MCP 离子检测器的时间设置相应的离子移除脉冲延时,其中移除脉冲可选择单脉冲或者多脉冲形式,脉冲之间的延时(延时 1、延时 2、延时 3)及脉冲宽度(Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3)可调。当离子的飞行时间与脉冲的延时及宽度一致时,施加于 G2 栅网的脉冲电场会使该离子偏离原来的飞行轨迹而无法到达 MCP 离子检测器,飞行时间与脉冲的延时及宽度不一致的离子则不受影响。

1.2 装置原理模拟仿真

为验证离子推移功能的可行性,针对飞行

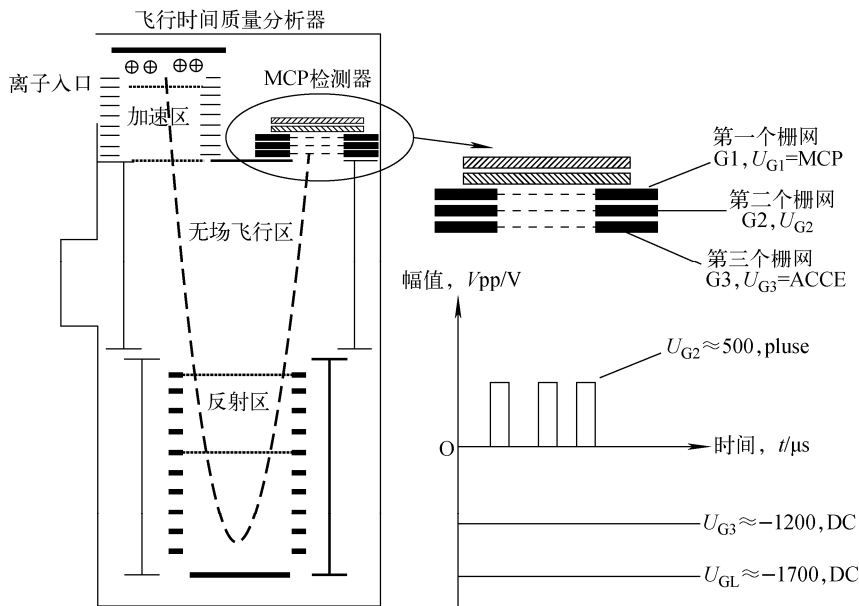


图 1 飞行时间质量分析器整体示意图

Fig. 1 Diagram of time-of-flight mass spectrometry

时间质量分析器建立模型进行 SIMION 模拟。在无场飞行区与离子检测器之间设置一个由 3 个栅网电极组成的结构,栅网之间绝缘,自上而下分别施加检测器电压、移除脉冲电压、无场飞行区电压,预设 H_2O^+ 、 N_2^+ 、 Ar^+ 3 种离子的质荷比(m/z)分别为 18、28、40,初始随机空间分散为 2 mm,横向动能 15 eV。通过理论计算及模拟优化电压使二次聚焦点的位置恰好在检测区的位置, H_2O^+ 、 N_2^+ 、 Ar^+ 到达检测区的飞行时间分别集中在 $6.42 \sim 6.47 \mu s$ 、 $8.00 \sim 8.07 \mu s$ 、 $9.56 \sim 9.65 \mu s$,因此确定推移脉冲相对

Trigger 的延时为 $7.90 \mu s$ 。调节推移脉冲脉宽,使 N_2^+ 全部被推除而不影响其他离子的正常检测,模拟效果图示于图 3。在图 3a 和 3c 中, H_2O^+ 和 Ar^+ 可顺利到达检测器;而在图 3b 中, N_2^+ 受到第 2 个栅网脉冲电场的阻挡而无法到达检测器。

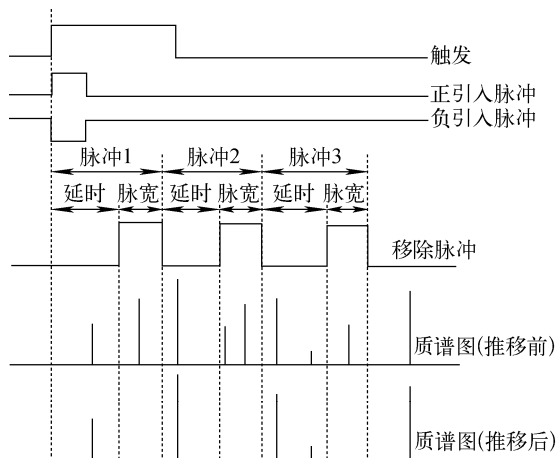
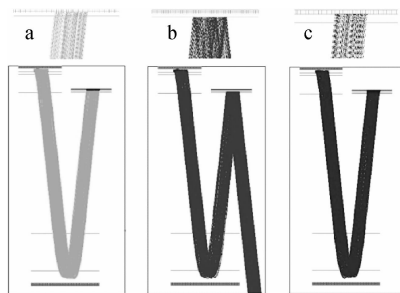


图 2 离子移除脉冲时序图

Fig. 2 Sequence diagram of removal pulse



注:a. H_2O^+ ; b. N_2^+ ; c. Ar^+

图 3 离子移除模拟示意图

Fig. 3 Simulated schematic of the removal of ions

2 实验部分

2.1 主要仪器与试剂

实验所用仪器为广州禾信仪器股份有限公司自主研发的在线挥发性有机物质谱仪^[13-14]。实验样品苯(C_6H_6)、甲苯(C_7H_8)、二甲苯(C_8H_{10})、氯苯(C_6H_5Cl)混合标准气体:体积浓度 5×10^{-6} ,大连大特气体有限公司产品;平衡

气为 99.999% 的氮气(N_2):广州粤佳气体有限公司产品。

2.2 实验条件

本实验在仪器的 MCP 检测器前端增加了由 3 个栅网组成的离子移除装置,脉冲装置按照可连续输出 3 个脉冲电场,且各脉冲延时及脉宽独立可调的设计,将仪器调至 PEI 电离模式^[15-17]。

3 结果与讨论

3.1 未施加移除功能的质谱图特征

将在线挥发性有机物质谱仪的电离方式调至 PEI 模式,对体积浓度为 5×10^{-6} 的苯、甲苯、二甲苯、氯苯混合标准气体样品进行检测,关闭移除脉冲。在 PEI 模式下,由于标气中的平衡气有氮气,在线挥发性有机物质谱仪除检测到分子离子峰 $C_6H_6^+$ (m/z 78)、 $C_7H_8^+$ (m/z 92)、 $C_8H_{10}^+$ (m/z 106)、 $C_6H_5Cl^+$ (m/z 112) 外,还同时检测到了离子峰 H_2O^+ (m/z 18)、 N_2^+ (m/z 28),所对应的飞行时间分别为 $14.28 \mu s$ ($C_6H_6^+$)、 $15.50 \mu s$ ($C_7H_8^+$)、 $16.65 \mu s$ ($C_8H_{10}^+$)、 $17.15 \mu s$ ($C_6H_5Cl^+$)、 $6.89 \mu s$ (H_2O^+)、 $8.58 \mu s$ (N_2^+) ,其质谱图示于图 4。

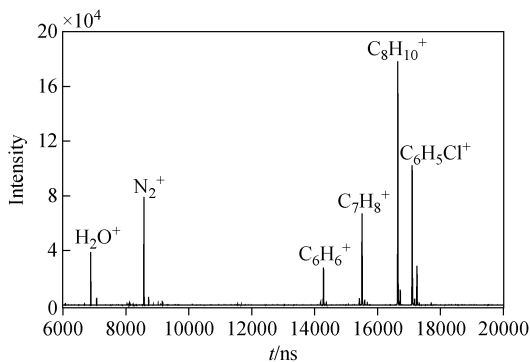


图 4 体积浓度为 5×10^{-6} 的苯、甲苯、二甲苯、氯苯混合标准气体样品的质谱图

Fig. 4 Spectrum of 5×10^{-6} volume concentration mixed gas sample with benzene, toluene, xylene, chlorobenzene

3.2 施加脉冲移除功能性能表征

3.2.1 单个移除脉冲对单段离子的选择性移除 根据离子的飞行时间确定移除脉冲相对 Trigger 的延时,优化脉冲的占空比及幅值 (380 V),设置脉冲宽度为 $0.40 \mu s$,分别对

H_2O^+ 、 N_2^+ 、 $C_7H_8^+$ 进行移除,参数列于表 1,移除效果示于图 5。结果表明,设置或者调节脉冲延时和脉冲宽度,可以对飞行时间范围内任意飞行时间和时间宽度(一段离子)的目标离子进行选择性移除。

表 1 单移除脉冲参数

Table 1 Parameters of single removal pulse

序号 No.	脉冲 1 延时 Delay time of pluse 1/ μs	目标离子 Target ion	图号 Figure number
1	无	无	图 5a
2	6.50	H_2O^+	图 5b
3	8.30	N_2^+	图 5c
4	16.40	$C_7H_8^+$	图 5d

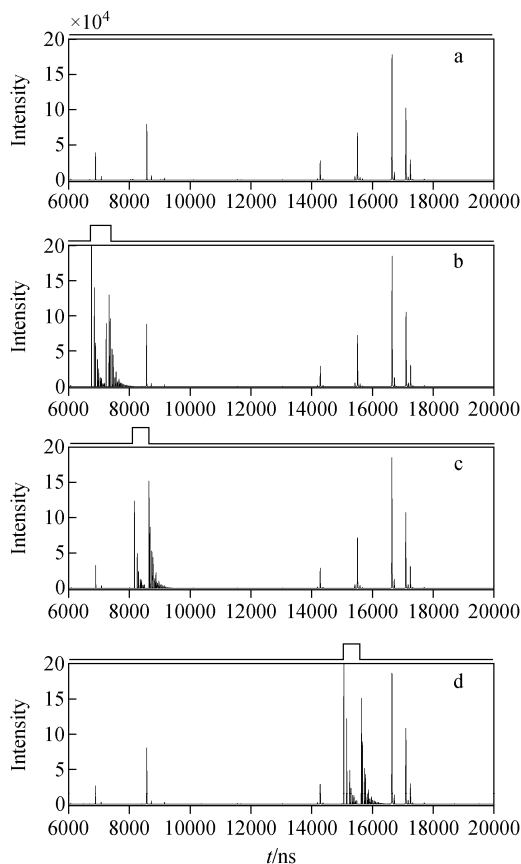


图 5 单移除脉冲效果图

Fig. 5 Effect of single removal pulse

3.2.2 多个移除脉冲对多段离子的选择性移除 分别设置 3 组参数进行测试,第 1 组无任何离子被移除,第 2 组移除了 H_2O^+ 和 $C_6H_6^+$,

第3组移除了 H_2O^+ 、 C_6H_6^+ 和 $\text{C}_8\text{H}_{10}^+$, 具体参数设置列于表2, 移除效果示于图6。测试结果表明, 通过设置或者调节多个脉冲延时可对飞

行时间范围内的任意多段飞行时间的离子进行有效移除, 可实现对某种或者某几种不同质荷比的离子进行选择性地移除。

表2 多移除脉冲参数
Table 2 Parameters of multiple removal pulses

序号 No.	脉冲1延时 Delay time of pluse 1/ μs	目标离子1 Target ion 1	脉冲2延时 Delay time of pluse 2/ μs	目标离子2 Target ion 2	脉冲3延时 Delay time of pluse 3/ μs	目标离子3 Target ion 3	图号 Figure number
1	无	无	无	无	无	无	图6a
2	6.50	H_2O^+	13.90	C_6H_6^+	无	无	图6b
3	6.50	N_2^+	13.90	C_6H_6^+	16.10	$\text{C}_8\text{H}_{10}^+$	图6c

注: 各个脉冲宽度 $0.40 \mu\text{s}$, 幅值 380 V

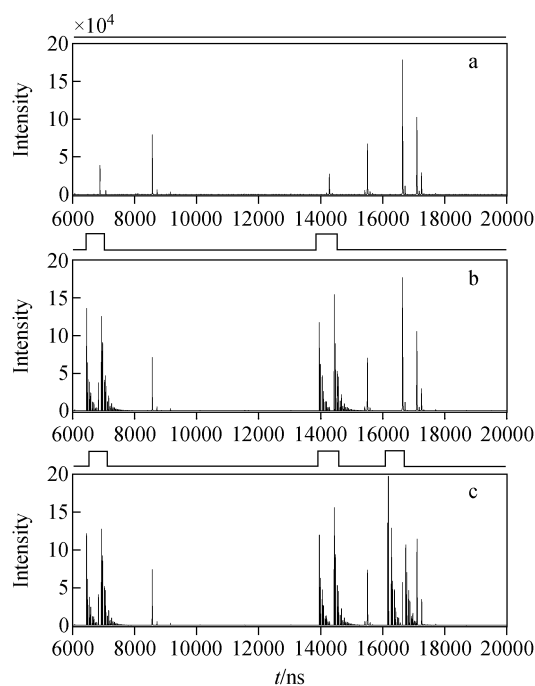


图6 多脉冲移除效果示意图

Fig. 6 Effect of multiple removal pulses

3.3 移除脉冲对其他离子的影响

为考察移除脉冲对其他离子的影响, 设置脉冲1的延时为 $16.40 \mu\text{s}$, 脉宽 $0.40 \mu\text{s}$, 幅值 380 V , 得到的谱图示于图7。在该实验条件下, 最强的离子峰 $\text{C}_8\text{H}_{10}^+$ 被移除而其他离子被检测的情况示于图7a。由于脉冲上升沿及下降沿的振荡会对目标离子一定范围内相邻的离子产生一定的干扰, 影响时间约 $1 \mu\text{s}$ 。 N_2^+ 、 C_7H_8^+ 、 $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}^+$ 施加离子移除脉冲前

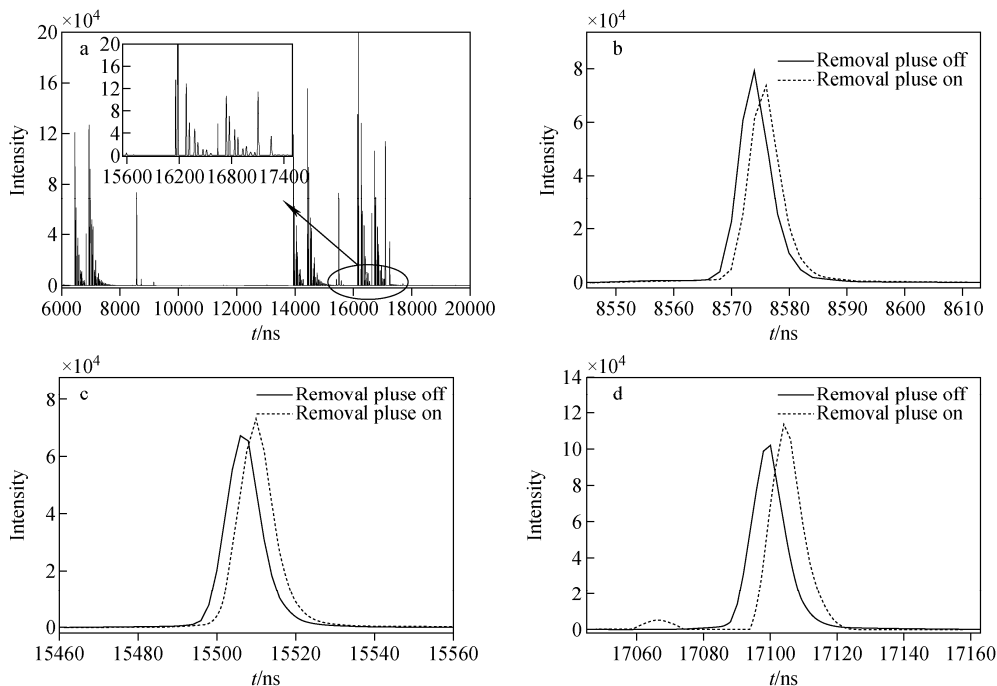
后, 各离子的峰强度、峰面积、分辨率及基线分别示于7b、7c、7d, 结果表明, 各参数基本无差异。在实际应用过程中, 例如, 在全二维气相色谱-质谱联用仪中移除载气产生的 He^+ (m/z 4) 时, 移除脉冲不会对后续离子产生干扰; 在检测某些特定目标化合物的应用过程中, 如国家标准《乘用车内空气质量评价指南》中, 可以将水气以及复杂的背景干扰离子移除, 只需检测苯、甲醛、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、乙醛和丙烯醛的信号峰, 即使存在振荡干扰的现象, 也对分析结果没有影响, 并可减少 MCP 检测器的衰减。另外, 在高分辨飞行时间质量分析器中, 当分辨率足够高时 (相邻的信号峰之间的时间大于振荡产生干扰的时间), 振荡产生的干扰不足以影响相邻的信号峰。

在后续研究中, 可尝试通过以下方法消除或者减少振荡产生的干扰: 1) 通过改善电路屏蔽、检测器屏蔽, 优化脉冲等方法减少脉冲下沿振荡产生的干扰; 2) 设计更高精度的脉冲电路, 通过调整离子移除脉冲宽度减少“干扰”, 如将脉冲宽度设置成质谱峰对应的宽度以尽可能的减少“干扰”。

由于 G2 栅网处于 MCP 离子检测器与无场飞行区之间, 在没有施加移除脉冲时, G2 的电势为 0 V , 施加移除脉冲时, 脉冲低电位的电势大约为 4 V 。移除脉冲电势图示于图8, 该电势会对 G2 栅网产生微弱电场, 阻碍其他目标离子的飞行, 因此目标离子的飞行时间整体有

微小增加,可通过质荷比进行校正。以图 7b、7c、7d 为例,在开启离子移除前,以 N_2^+ 、 $C_6H_5Cl^+$ 为标准对 $C_7H_8^+$ 进行质荷比较正;以 N_2^+ 、 $C_7H_8^+$ 为标准对 $C_6H_5Cl^+$ 进行质荷比较正;以 $C_7H_8^+$ 、 $C_6H_5Cl^+$ 为标准对 N_2^+ 进行质荷

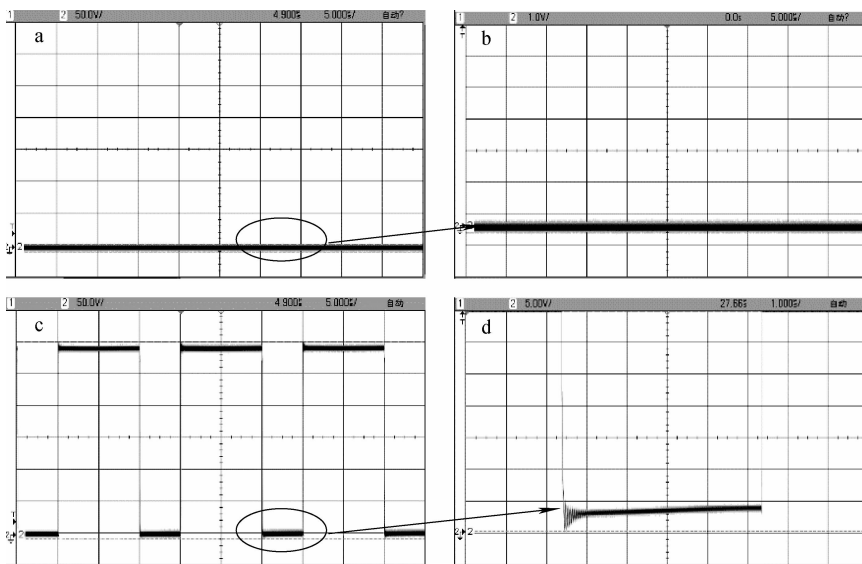
比较正。以同样的方法对开启离子移除后的 N_2^+ 、 $C_7H_8^+$ 、 $C_6H_5Cl^+$ 进行质荷比较正,结果列于表 3。脉冲移除前后 m/z 的测量误差仅为 0.05%、0.05% 和 0.01%,对质谱分析的影响可以忽略不计。



注: a. $C_8H_{10}^+$ 被移除后的质谱图; b、c、d 分别为施加离子移除脉冲前后, N_2^+ 、 $C_7H_8^+$ 、 $C_6H_5Cl^+$ 的离子峰

图 7 移除脉冲对其他离子的影响

Fig. 7 Effect of removal pulse on other ions



注: a. 不开启脉冲移除; b. a 的局部放大图; c. 开启脉冲移除; d. c 的局部放大图

图 8 移除脉冲电势图

Fig. 8 Potential of removal pulse

表 3 离子移除装置开启前后质荷比校正结果的对比

Table 3 Comparison of mass calibration before and after opening the removal pluse

目标离子 Target ion	飞行时间 Time of flight/ns		m/z 校正值 m/z Calibration		m/z 标准值 Standard value of m/z
	移除前	移除后	移除前	移除后	
	Before	After	Before	After	
N_2^+	8574	8576	28.0510	28.0379	28.00614
$C_7H_8^+$	15506	15510	92.0950	92.0518	92.0626
$C_6H_5Cl^+$	17100	17104	112.0286	112.0226	112.0080

4 结论

本文介绍了一种用于飞行时间质谱仪的离子选择性移除装置,并检验了其应用性能。在单个脉冲工作模式下,通过优化脉冲参数、改变脉冲延时,可以实现在飞行时间范围内对任意目标离子峰的移除,通过设置脉宽可以实现某段飞行时间范围离子的移除;在多个脉冲工作模式下,可以同时实现多段飞行时间离子的有效移除。除了由脉冲上升沿和下降沿引起的质谱信号振荡对相邻区域产生一定的影响外,对振荡范围外的离子相对强度、峰面积、分辨率及基线等没有明显的影响。该方法可对无需检测的离子进行有效移除,从而减少 MCP 离子检测器的消耗,延长其使用寿命。

致谢:感谢广州禾信仪器股份有限公司的邓伟、陈景鸿、刘耀良、吕金诺等工程师在项目开发过程中给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 许国旺,叶芬,孔宏伟,路鑫,赵欣捷. 全二维气相色谱技术及其进展[J]. 色谱, 2001, 19(2): 132-136.
XU Guowang, YE Fen, KONG Hongwei, LU Xin, ZHAO Xinjie. Technique and advance of comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2001, 19(2): 132-136(in Chinese).
- [2] SANTOS F J, GALCERAN M T. Modern developments in gas chromatography-mass spectrometry-based environmental analysis[J]. Journal of Chromatography A, 2003, 1 000(1): 125-151.
- [3] SHELLIE R, MONDELLO L, MARRIOTT P, DUGO G. Characterisation of lavender essential

oils by using gas chromatography-mass spectrometry with correlation of linear retention indices and comparison with comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 2002, 970(1): 225-234.

- [4] 赵晓光,薛燕. 迅速发展中的生物质谱仪及相关高新技术[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(5): 237-240.
ZHAO Xiaoguang, XUE Yan. Bio-mass spectrometry in progress and related technology[J]. Chinese Journal Scientific Instrument, 2002, 23(5): 237-240(in Chinese).
- [5] 伍小梅,彭真,董俊国,高伟,黄正旭,程平,周振. 在线检测挥发性有机物的质子转移反应飞行时间质谱仪的研制[J]. 质谱学报, 2015, 36(1): 1-7.
WU Xiaomei, PENG Zhen, DONG Junguo, GAO Wei, HUANG Zhengxu, CHENG Ping, ZHOU Zhen. Development of proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometer for on-line detection of volatile organic compounds[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometer Society, 2015, 36(1): 1-7(in Chinese).
- [6] QING J, HUANG Z, ZHANG Y, ZHU H, Tan G, GAO W, YANG P Y. A miniaturised electron ionisation time-of-flight mass spectrometer that uses a unique helium ion removal pulsing technique specifically for gas analysis[J]. Analyst, 2013, 138(12): 3 394-3 401.
- [7] WOLF B, MUDGETT P D, MACFARLANE R D. A new method for electrostatic ion deflection [J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 1990, 1(1): 28-36.
- [8] EIDEN G C, BARINAGA C J, KOPPENAAL D W. Method for reduction of selected ion intensities in confined ion beams, US5767512[P]. 1998.

- [9] FREY R, HOLLE A, WEISS G. Method and apparatus for generating ions from thermally unstable, non-volatile, large molecules, particularly for a mass spectrometer such as a time-of-flight mass spectrometer; US, US5294797[P]. 1994.
- [10] UGAROV M. Ion deflection in time-of-flight mass spectrometry; US9029763[P]. 2015.
- [11] WU Q, HUA L, HOU K, CUI H, CHEN P. A combined single photon ionization and photoelectron ionization source for orthogonal acceleration time-of-flight mass spectrometer[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2010, 295(1): 60-64.
- [12] 高伟, 黄正旭, 郭长娟, 粘慧青, 董俊国, 傅忠, 陈少得, 周振. 电子轰击源垂直加速式飞行时间质谱仪的研制[J]. 质谱学报, 2008, 29(4): 209-217.
- GAO Wei, HUANG Zhengxu, GUO Changjuan, NIAN Huiqing, DONG Junguo, FU Zhong, CHEN Shaode, ZHOU Zhen. Electron ionization and orthogonal acceleration time-of-flight mass spectrometer[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2008, 29(4): 209-217(in Chinese).
- [13] 谭国斌, 高伟, 黄正旭, 洪义, 傅忠, 董俊国, 程平, 周振. 真空紫外灯单光子电离源飞行时间质谱仪的研制[J]. 分析化学仪器装置与实验技术, 2010, 39(10): 1 470-1 475.
- TAN Guobin, GAO Wei, HUANG Zhengxu, HONG Yi, FU Zhong, DONG Junguo, CHENG Ping, ZHOU Zhen. Vacuum ultraviolet single photon ionization time-of-flight mass spectrometer[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 39(10): 1 470-1 475(in Chinese).
- [14] 谭国斌, 高伟, 洪义, 黄正旭, 李梅, 董俊国, 程平, 傅忠. 高灵敏度膜进样 VOCs 在线检测质谱仪的研制[J]. 现代科学仪器, 2011, 10(5): 59-62.
- TAN Guobin, GAO Wei, HONG Yi, HUANG Zhengxu, LI Mei, DONG Junguo, CHENG Ping, FU Zhong. Development of high sensitivity membrane introduction mass spectrometer for on-line detecting VOCs[J]. Modern Scientific Instruments, 2011, 10(5): 59-62(in Chinese).
- [15] 吴庆浩, 花磊, 侯可勇, 崔华鹏, 陈平, 赵无垠, 王卫国, 李京华, 李海洋. 新型单光子电离和光电子电离复合电离源的研究与应用[J]. 分析化学仪器装置与实验技术, 2011, 39(10): 1 465-1 469.
- WU Qinghao, HUA Lei, HOU Keyong, CUI Huapeng, CHEN Ping, ZHAO Wuduo, WANG Weiguo, LI Jinghua, LI Haiyang. Characterization and applications of combined single photon ionization and photoelectron ionization source[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2011, 39(10): 1 465-1 469(in Chinese).
- [16] 洪义, 高伟, 谭国斌, 周振. VOCs 在线检测质谱仪单光子电离源的研制[J]. 自动化与仪表, 2012, 27(6): 1-3.
- HONG Yi, GAO Wei, TAN Guobin, ZHOU Zhen. Research on single photon ionization sources of mass spectrometer for on-line detection of VOCs[J]. Automation & Instrumentation, 2012, 27(6): 1-3(in Chinese).
- [17] 顾超峰, 谭国斌, 李操, 麦泽斌, 黄正旭, 李梅, 王姜, 杨俊卿, 程平. 封闭式单光子/光电子离子源及其在酒类质谱鉴别中的初步应用[J]. 现代科学仪器, 2014, (5): 29-35.
- GU Chaofeng, TAN Guobin, LI Cao, MAI Zebin, HUANG Zhengxu, LI Mei, WANG Jiang, YANG Junqing, CHENG Ping. Enclosed single-photon (SPI)/photoelectron (PEI) ionization complex ion source and its preliminary application in the identification of wine mass spectrometer [J]. Modern Scientific Instruments, 2014, (5): 29-35(in Chinese).