

反向离子迁移谱离子门驱动电源研制及应用

黎皖君^{1,2}, 罗元江², 孔令文², 郝家焕², 李 阳², 夏 磊², 刘亚伟²,
沈成银², 黄超群², 储焰南²

(1. 安徽大学, 物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 健康与医学技术研究所, 医学物理与技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 反向离子迁移谱(inverse ion mobility spectrometry, IIMS)的分辨率相较于传统离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)提高了 30%~60%。然而, IIMS 的离子门驱动电源一般需要进行高压隔离, 导致其结构复杂且成本较高。基于此, 本研究设计开发了一款用于 IIMS 的离子门驱动控制电源, 其具有结构简单、无需额外高压隔离、制作成本低以及控制方便等优点。经检测, 该电源的脉冲上升和下降响应时间均达到了设计指标, 可满足 IIMS 的信号检测需求。以 IIMS 的反应离子为研究对象进行实验验证, 该电源的脉冲幅值和脉冲宽度对 IIMS 性能的影响符合理论分析, 且分辨率较传统 IMS 提高了 45%, 与文献报道相符, 进一步验证了该离子门驱动电源在 IIMS 仪器应用中的可行性。

关键词: 离子迁移谱(IMS); 反向离子迁移谱(IIMS); 离子门电源; 分辨率

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2025)05-0554-08

DOI: 10.7538/zpxb.2025.0008

CSTR: 32365.14.zpxb.2025.0008

Development and Application of an Ion Gate Driving Power Supply for Inverse Ion Mobility Spectrometry

LI Wan-jun^{1,2}, LUO Yuan-jiang², KONG Ling-wen², HAO Jia-huan², LI Yang², XIA Lei², LIU Ya-wei²,
SHEN Cheng-yin², HUANG Chao-qun², CHU Yan-nan²

(1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Medical Physics and Technology, Institute of Health and Medical Technology,
Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Ion mobility spectrometry (IMS) is a trace detection technique. It realizes rapid separation and detection of ions by capitalizing on the disparities in the mobility velocities of ions in an electric field under atmospheric pressure. The ion gate is one of the core components for controlling the detection of IMS signals. Driving and controlling the ion gate effectively by means of the ion gate power supply is one of the main approaches to enhance the detection performance of IMS. The technology of inverse ion mobility spectrometry (IIMS) reverses the control mode of the ion gate in traditional IMS from “off-on-off” to “on-off-on”. As the ion gate remains open for an extended period, the drift region of the drift tube is filled with a continuous ion flow. When the ion gate is

briefly closed, a charge-free depression peak emerges in the continuous ion flow. Due to the strong Coulomb repulsion among ions, the depression peak is narrowed, and the resolution of IIMS is increased by 30% to 60% compared to traditional IMS. Nonetheless, the ion gate drive power supply required for IIMS necessitates the incorporation of a high-voltage isolation circuit, which complicates the system architecture and increases associated costs. This research carried out a study on the power supply control technology for the IIMS ion gate. The proposed power supply was characterized by its simplified architecture, the elimination of additional high-voltage isolation circuits, reduced manufacturing costs, and improved ease of control. Testing results indicated that the pulse rise and fall response times of this power supply conform to the established design specifications and adequately fulfill the signal detection requirements of IIMS. Experimental validation utilizing the reactant ions of IIMS revealed that the effects of pulse amplitude and pulse width on IIMS performance align with theoretical predictions. Moreover, the resolution of IIMS improved by 45% in comparison to traditional IMS, thereby corroborating reported literature and reinforcing the feasibility of this ion gate drive power supply for IIMS applications.

Key words: ion mobility spectrometry (IMS); inverse ion mobility spectrometry (IIMS); ion gate power supply; resolution

离子迁移谱 (ion mobility spectrometry, IMS) 起源于 20 世纪 60 年代, 是一种痕量分析检测技术, 通过利用大气压下离子在电场中迁移速度的差异来实现对离子的快速分离和探测。由于 IMS 仪器在大气压环境下工作, 无需真空, 因此, 又被称为“大气压下的飞行时间质谱仪”。IMS 具有响应快速、灵敏度高、结构简单等优点, 广泛应用于痕量挥发性有机物 (如毒品^[1-2]、爆炸物^[3-4]和化学毒剂^[5-6]等毒害危险品) 的现场快速检测。

对于常规漂移管式离子迁移谱 (drift tube ion

mobility spectrometry, DT-IMS) 而言, 离子在均匀电场 E 下做迁移运动, 运动速度为:

$$V_d = K \cdot E \quad (1)$$

式中, K 为离子迁移率, 与分子的结构、质量、碰撞截面、环境湿度等因素有关。由此可知, 离子的运动速度是与离子质量和碰撞截面相关的函数。如果令离子门在短时间 t_g 内开启, 离子包将以脉冲形式进入迁移区, 质量不同或碰撞截面不同的离子到达探测器的迁移时间不同。测量离子流强度与迁移时间的关系, 可获得离子迁移谱图, 示于图 1。

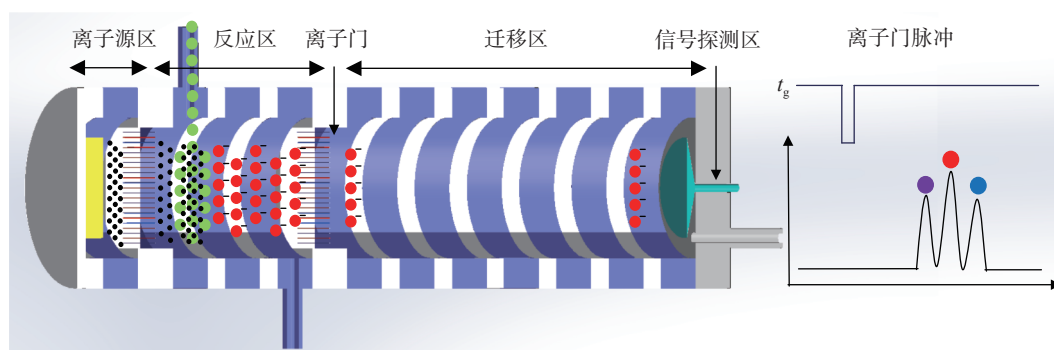


图 1 DT-IMS 工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of the DT-IMS operation principle

从 DT-IMS 的工作原理可以看出, 离子门是控制 IMS 信号检测的核心部件之一, 利用离子门电源有效驱动和控制离子门是提高 IMS 检测

性能的主要方法之一。近年来, 国内外研究团队围绕离子门控制开展了许多卓有成效的工作, 大幅提高了 IMS 的检测灵敏度和分辨率^[7-17]。其中,

反向离子迁移谱(inverse ion mobility spectrometry, IIMS)技术将传统 IMS 的离子门控制由“关-开-关”模式颠倒成“开-关-开”模式,以提高仪器的检测性能^[13-17]。在这种“开-关-开”模式下,离子门开启的时间占1个离子门脉冲周期的99%以上。由于离子门长时间处于开启状态,迁移管的迁移区将充满连续离子流;当离子门短时间关闭时,连续离子流中会产生1个无电荷的凹陷峰。研究人员把这种凹陷峰视为 IIMS 的离子信号。由于离子间强烈的库伦斥力将凹陷峰压窄, IIMS 的分辨率比传统 IMS 提高了30%~60%^[16]。该技术为 IMS 的高性能检测提供了新思路,开发适用于 IIMS 离子门控制的脉冲电源值得关注。

在传统 IMS 仪器中,由于离子门所处位置的电势高达数千伏,其驱动电源不仅要在地隔离高压,还要具备数千伏的耐压能力,导致其结构复杂且成本较高。针对这一情况,本团队设计了一种基于交流叠加的新型离子门驱动电源^[18],在传统 DT-IMS 的离子门控制中取得了较好的应用^[19]。在这一技术的基础上,针对 IIMS 对离子门控制电源的现实需求,本工作将开发结构简单、无需隔离的 IIMS 离子门驱动和控制电源,并与 IIMS 实验检测相结合,研究该电源在不同脉冲幅值和宽度条件下对 IIMS 反应离子峰的位置、面积和分辨率的影响,验证其对 IIMS 的驱动与控制性能。

1 IIMS 驱动与控制电源的设计与制作

1.1 IIMS 工作原理

与 IMS 相同, IIMS 主要由离子源区、反应区、离子门、迁移区及信号探测区5部分构成。

离子源产生的反应物离子在反应区与待测物分子发生离子-分子反应,生成产物离子。离子门脉冲电源控制离子门的通断,进入迁移区的离子在电场作用下向信号探测区迁移,探测装置检测离子信号并传送给计算机进行处理。

IIMS 与 IMS 的唯一区别在于离子门的驱动与控制模式。以典型的 Bradbury-Nielsen (BN)型离子门为例, BN 离子门介于迁移管反应区与迁移区之间,其截面和信号产生示意图示于图2。以正离子检测模式为例,在离子门脉冲工作的1个周期内,当相邻且相互绝缘的2组金属丝 A 和 B 之间存在电势差 V_g 时,离子门将在迁移管横截面方向形成关门电场,离子被导线 A、B 之间垂直于离子运动方向的电场阻断而无法通过离子门;当在离子门上施加的脉冲为低电平时,金属丝 A、B 电位相等,此时离子门打开,离子通过,离子束在迁移电场作用下进入迁移区,获得谱峰向上的正离子 IMS 谱图。信号峰的宽度主要取决于离子门的开门时间。在这种控制模式下,离子信号占空比约为1%。而对于 IIMS 来说,金属丝 A 和 B 长时间处于等电势状态,即离子门保持开启,离子连续进入迁移区;当离子门脉冲短暂切换为高电平 V_g 时,离子流被离子门电压阻断而形成一个无电荷的凹陷区,探测器获得一个方向相反的凹陷峰。如上文所述,由于凹陷区两侧离子的库伦斥力, IIMS 的信号峰更窄,分辨率更高。

1.2 离子门驱动电源设计方案

本文研制的离子门驱动电源主要由脉冲产生模块、脉冲驱动模块和供电模块组成。脉冲产生模块生成宽度与频率可调的窄脉冲信号;脉冲驱动模块放大脉冲信号的幅值并将其叠加在

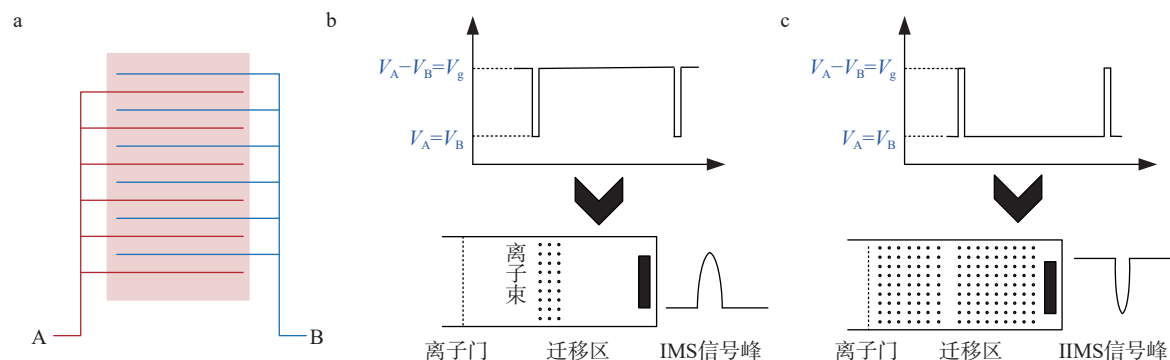


图2 BN型离子门截面示意图(a), IMS(b)和 IIMS(c)信号产生示意图

Fig. 2 Cross-section schematic of BN gate (a), and signal generation schematics of IMS (b) and IIMS (c)

离子门上;供电模块为整个电子系统提供有效的电源管理和信号传递方式。

脉冲产生模块选用 LM555 时基芯片与外围电路构成多谐振荡器,以产生周期性方波信号,其频率可由滑动变阻器调节。74HC123 芯片内部集成 2 个具有重触发功能的单稳态触发器,通过调节滑动变阻器可对脉冲宽度进行精细调节。该芯片可同时输出 2 个方向相反的 5 V 脉冲信号 Q1 和 Q2。经测试,产生的脉冲频率可在 10~100 Hz 区间内灵活调节,脉冲宽度的可调范围为 100~1 000 μs ,这种大范围的参数调节能力为离子门的精准控制奠定了基础。

在脉冲驱动模块设计中,核心放大电路部分由 J1、J2、J3 及 J4 共 4 个晶体管构成。其中, J1 和 J2 为 PNP 型晶体管 2SA1486, J3 和 J4 为 NPN 型晶体管 2SC3840;它们的集电极-基极和集电极-发射极间最大电压均为 600 V,耐压值能够满足脉冲幅值的放大需求。由脉冲产生模块生成的脉冲信号 Q1 与 Q2 通过拨动开关后可选择其中之一输入至放大电路。快速恢复整流二极管 FR107 用于阻止电流反向流动,以降低开关损耗并提高系统效率。当输入脉冲信号为高电平时,晶体管 J1 和 J4 受电信号驱动而导通,与之相对的 J2 和 J3 则处于截止状态。此时,离子门两端的电位趋于一致,离子可通过离子门进入迁移区。反之,当输入脉冲切换为低电平时,晶体管的工作状态发生改变, J1 和 J3 导通, J2 和 J4 截止。此时,电源电压 HV 经高压电容后施加于离子门两端,形成一个垂直于离子运动方向的电场,有效阻止离子进入迁移区。通过脉冲驱动模块, 5 V 脉冲信号 Q1 和 Q2 分别放大为负高压脉冲 P1 和正高压脉冲 P2,可满足离子门对不同极性脉冲控制的需求。

在供电模块中,为驱动晶体管并将脉冲幅值放大至数百伏,选用 EMCO F10CTR 高压直流转换器模块生成低噪声、低纹波的 HV 信号。该模块与三端可调稳压器 LM317 搭配使用,使得 HV 在 50~500 V 范围内自由调节。12 V 电源用于为 LM317 芯片提供工作电压,此外,脉冲产生模块中的 LM555 和 74HC123 芯片还需 5 V 电压驱动,因此选用 LM7805 稳压电源完成 12 V 至 5 V(VCC)的电平转换。

基于以上电路设计,研制出一款 IIMS 离子门驱动电源,经 PCB 打样后对其进行元器件焊接和功能调试,其 3D 预览图示于图 3。与传统高压隔离离子门电源相比,该电源模块利用高压电容所具有的隔直流通交流特性,摆脱了对传统隔离变压器的依赖,不仅简化了电源结构,降低了硬件成本,还显著提升了系统的安全性与稳定性。该电源产生的离子门控制信号长时间处于零电位状态,仅在短时间内输出高压脉冲,这种特殊的信号产生模式与 IIMS 的工作原理高度契合。

1.3 实验验证

为验证离子门驱动电源的性能,本课题组结合自主研制的 IIMS 仪开展实验检测。IIMS 仪采用电晕放电作为电离源,迁移管由金属电极环与聚四氟绝缘环依次堆叠组成,金属电极环上通过高精度电阻分压在迁移管内产生约 300 V/cm 的均匀电场。在迁移管的反应区与迁移区之间安装有 BN 型离子门,离子门驱动电源叠加在 BN 型离子门处,以控制离子门的周期性打开和关闭。迁移管末端的法拉第板用于收集离子产生的电流信号,该信号经放大器放大后进入数据采集系统处理。实验过程中,通过监控不同实验条件下反应离子的变化作为评价指标,所有实验均在室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下进行。

2 结果与讨论

2.1 脉冲输出响应测试

离子门驱动脉冲的上升和下降速度会影响离子束的空间分布,进而影响仪器的分辨率和灵敏度。理想状态下,上升和下降速度越快越好。当离子门脉冲宽度设置为 200 μs ,脉冲幅值为 200 V,脉冲频率为 20 Hz 时,利用示波器对离子门驱动电源输出脉冲的上升沿和下降沿的宽度进行监测,结果示于图 4。在负脉冲 P1 中,脉冲的下降时间和上升时间分别为 0.24、5.36 μs ,分别占脉冲宽度的 0.12%和 2.68%。虽然上升速度大于下降速度易导致谱图产生拖尾现象,但这种小拖尾对仪器的性能影响较小。对于正脉冲 P2,上升时间和下降时间分别为 0.88、1.36 μs ,分别占脉冲宽度的 0.44%和 0.68%。该

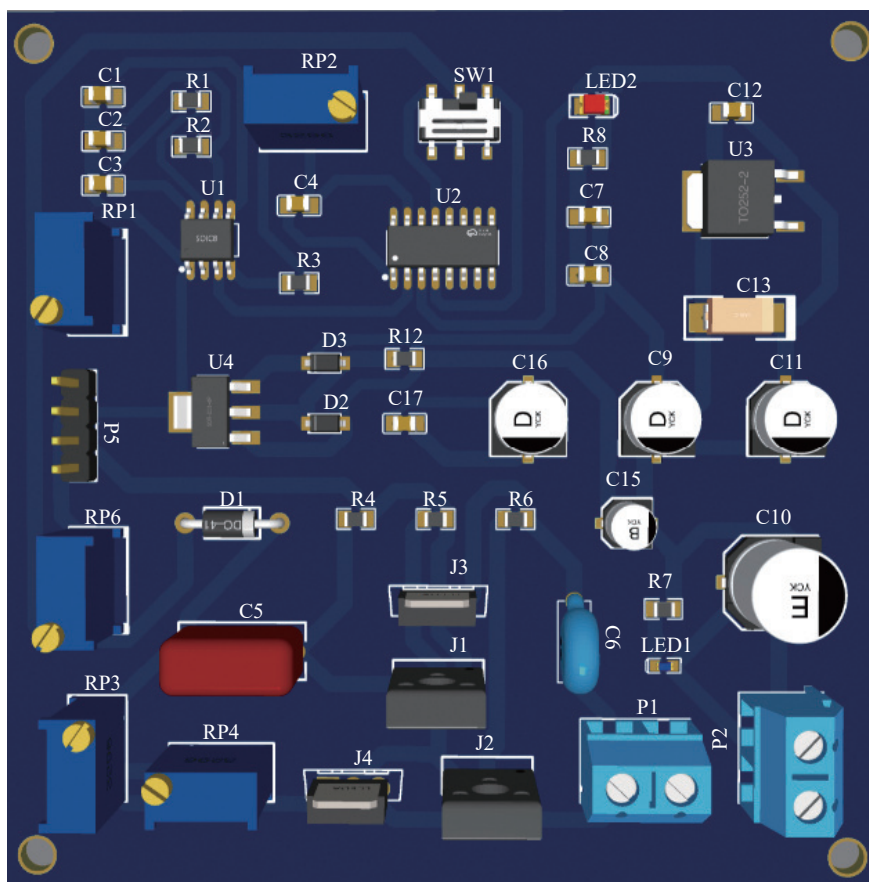


图3 离子门驱动电源 3D 图

Fig. 3 3D diagram of the ion gate driving power supply

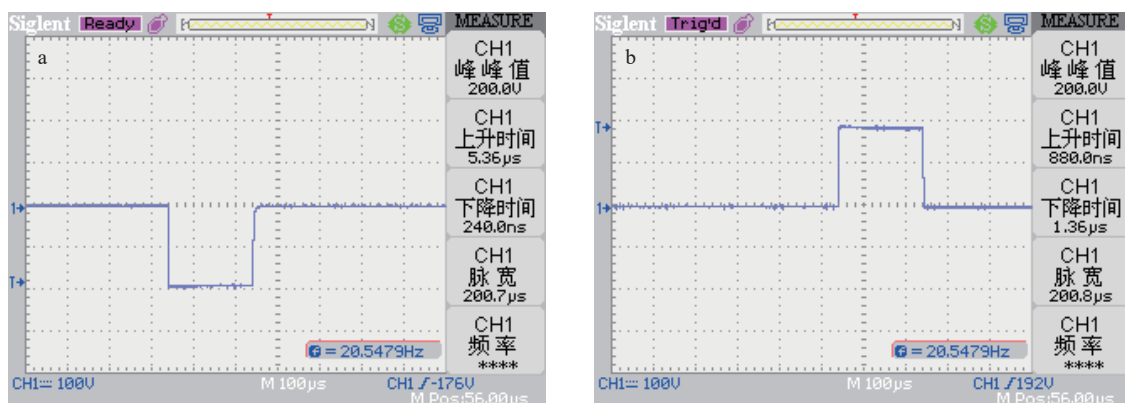


图4 负脉冲 P1(a)和正脉冲 P2(b)的输出响应测试

Fig. 4 Output response of negative pulse P1 (a) and positive pulse P2 (b)

脉冲的整体性能较均衡,可满足 IIMS 的信号检测要求。

2.2 研制电源在 IIMS 中的应用

在 IIMS 中,脉冲电源的幅值和宽度是影响其性能的 2 个主要参数,为进一步验证所研制电源对 IIMS 性能的影响,检测了 IIMS 的负反应离

子在不同脉冲幅值和宽度条件下的变化情况,并开展了其在 IIMS 的应用研究。

2.2.1 脉冲幅值对 IIMS 性能的影响 驱动电源的脉冲宽度设为 200 μs ,在幅值 100~400 V 范围内,每隔 50 V 对 IIMS 的负反应离子进行检测,结果示于图 5。可见,随着离子门关门电压的升

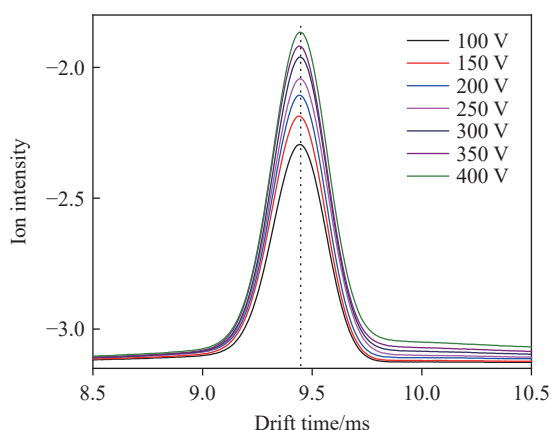


图5 不同脉冲幅值下的反应离子峰谱图
Fig. 5 Ion mobility spectra of the reactant ions at different pulse amplitudes

高,反应离子峰的位置几乎保持不变,表明在IIMS检测中,信号峰的位置与离子门关门电压的幅值大小无关。因此,改变离子门关门电压幅值不会影响信号峰中心离子的分布及运动轨迹。这种现象也出现在常规IMS检测中^[18]。

通常用信号峰面积来表征离子强度。由图5可见,IIMS反应离子强度随离子门关门电压的升高而显著增强。据报道^[20],在传统IMS检测中,离子门关门电压除在离子门上产生垂直于离子运动方向的阻挡电场外,还会排斥离子门两侧的离子,并在两侧形成无离子的耗尽区(depletion region),且耗尽区范围随关门电压升高而增大,从而降低检测灵敏度。类似的,在IIMS检测中,耗尽区的存在使无电荷凹陷区宽度随离子门关门电压的升高而逐渐增加,进而导致IIMS谱峰变宽、信号强度增大。

与IMS相同,IIMS的分辨率 R 可表示为:

$$R = \frac{t_d}{fwhm} \quad (2)$$

其中, t_d 为信号峰中心位置的迁移时间, $fwhm$ 为信号峰的半高全宽。由图5可以看出,随着关门电压的升高,信号峰位置虽保持不变,但其 $fwhm$ 逐渐增大,导致IIMS的分辨率随之下降。由于灵敏度和分辨率是IIMS的核心指标,有必要对离子门脉冲幅值进行优化,以获得更好的检测性能。

2.2.2 脉冲宽度对IIMS性能的影响 离子门脉冲宽度与IMS的检测灵敏度及分辨率密切相

关。通常来说,离子门脉冲宽度越窄,分辨率越高,但检测灵敏度会降低;而增大离子门脉冲宽度可提高IMS的检测灵敏度,却会损失仪器的分辨率。实验中,当离子门脉冲电压固定为200 V时,在100~500 μ s脉冲宽度范围内,每隔100 μ s对IIMS的负反应离子进行检测,结果示于图6。可见,随着离子门脉冲宽度的增大,反应离子峰逐渐右移,峰面积(即离子信号强度)随之增强。产生这种现象的原因是:IIMS检测中关闭离子门的作用是在离子流中形成无电荷凹陷区;当离子门关闭时,信号峰左边的起始点对应脉冲信号的上升沿;随着脉冲宽度的增加,凹陷区逐渐变宽,其中心也随之向右偏移。

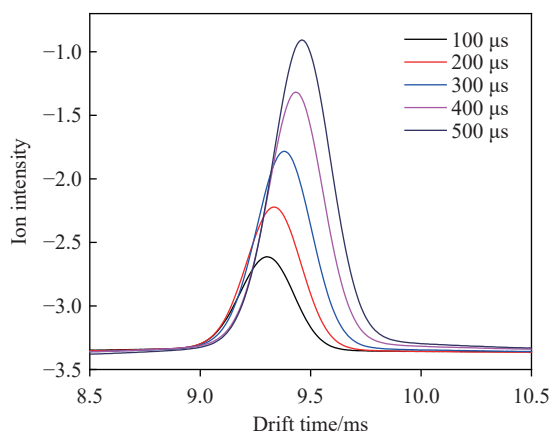


图6 不同脉冲宽度下的反应离子峰谱图
Fig. 6 Ion mobility spectra of the reactant ions at different pulse widths

利用式(2)进一步计算5个脉冲宽度下负反应离子的分辨率,结果分别为32.15、31.53、31.25、30.83和29.69,呈逐渐降低趋势。由此可知,尽管随着脉冲宽度的增大,信号峰的迁移时间 t_d 变大,但 $fwhm$ 增幅大于 t_d 增幅,导致IIMS的分辨率随脉冲宽度增加而减小,该规律与传统IMS一致^[21]。

2.3 IMS和IIMS的检测对比

IIMS技术的主要优势在于其能够显著提升仪器的分辨率。为验证所研制电源对IIMS分辨率的提升效果,在离子门电压200 V,脉冲宽度200 μ s的条件下,分别对IMS和IIMS的负反应离子进行检测,并利用式(2)计算分辨率,结果示于图7。可见,IMS与IIMS反应离子的谱图中心

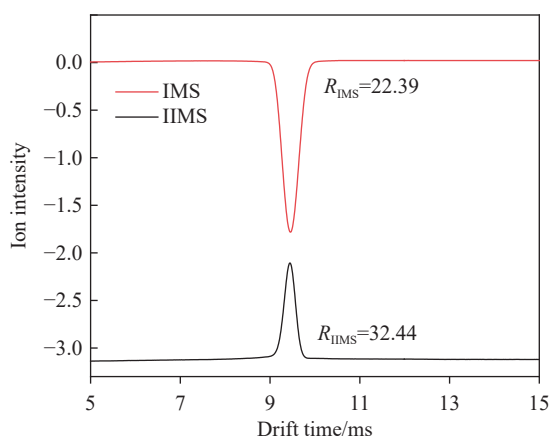


图7 IMS与IIMS的分辨率检测对比

Fig. 7 Comparison of resolutions between IMS and IIMS

位置基本一致。然而,与IMS相比,IIMS的信号强度降低约60%,而分辨率提高约45%,该结果与文献^[17]报道一致。上述实验结果进一步验证了所研制脉冲电源在IIMS离子门控制中的可行性。

3 结论

本研究开发了一款结构简单、无需高压隔离电路、成本低廉且操作便捷的离子门驱动电源,旨在实现对IIMS离子门的高效控制。通过检测电源脉冲输出的响应速度,证实了其对IIMS离子门的有效控制能力。同时,探讨了电源脉冲幅值和宽度对IIMS负反应离子峰位置、信号强度和分辨率的影响,验证了该电源应用于IIMS离子门控制的可行性。最后,通过对比传统IMS与IIMS的分辨率,所得检测结果与文献报道一致,进一步证实了所研制电源的可靠性。本研究可为新一代高性能离子迁移检测设备的开发提供核心硬件支撑,有助于推动IIMS技术在现场快速检测中的普及与应用。

参考文献:

- [1] VERKOUTEREN J R, STAYMATES J L. Reliability of ion mobility spectrometry for qualitative analysis of complex, multicomponent illicit drug samples[J]. *Forensic Science International*, 2011, 206(1/2/3): 190-196.
- [2] ROSCIOLI K M, TUFARIELLO J A, ZHANG X, LI S X, GOETZ G H, CHENG G, SIEMS W F, HILL H H. Desorption electrospray ionization (DESI) with atmospheric pressure ion mobility spectrometry for drug detection[J]. *Analyst*, 2014, 139(7): 1 740-1 750.
- [3] MÄKINEN M, NOUSIAINEN M, SILLANPÄÄ M. Ion spectrometric detection technologies for ultra-traces of explosives: a review[J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2011, 30(5): 940-973.
- [4] ROSCIOLI K M, DAVIS E, SIEMS W F, MARIANO A, SU W, GUHARAY S K, HILL H H. Modular ion mobility spectrometer for explosives detection using corona ionization[J]. *Analytical Chemistry*, 2011, 83(15): 5 965-5 971.
- [5] MÄKINEN M A, ANTTALAINEN O A, SILLANPÄÄ M E T. Ion mobility spectrometry and its applications in detection of chemical warfare agents[J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(23): 9 594-9 600.
- [6] YAMAGUCHI S, ASADA R, KISHI S, SEKIOKA R, KITAGAWA N, TOKITA K, YAMAMOTO S, SETO Y. Detection performance of a portable ion mobility spectrometer with ⁶³Ni radioactive ionization for chemical warfare agents[J]. *Forensic Toxicology*, 2010, 28(2): 84-95.
- [7] 仓怀文, 李杭, 黄卫, 张远智, 李京华, 王卫国, 李海洋. 基于脉冲波形调控离子分布提升离子迁移谱性能的研究[J]. *分析化学*, 2021, 49(12): 2 067-2 074.
CANG Huaiwen, LI Hang, HUANG Wei, ZHANG Yuanzhi, LI Jinghua, WANG Weiguo, LI Haiyang. Improving performance of ion mobility spectrometry using Bradbury-Nielsen ion gate pulse waveform modulation[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 49(12): 2 067-2 074(in Chinese).
- [8] 代渐雄, 段忆翔. 微波诱导等离子体离子迁移谱性能及影响因素的研究[J]. *分析化学*, 2016, 44(11): 1 686-1 691.
DAI Jianxiong, DUAN Yixiang. Research of influence factors on performance of microwave induced plasma ionization ion mobility spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2016, 44(11): 1 686-1 691(in Chinese).
- [9] CHEN C, CHEN H, JIANG D, LI M, HUANG W, LI H. Enhancing the sensitivity of ion mobility spectrometry using the ion enrichment effect of non-uniform electrostatic field[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 295: 179-185.
- [10] CHEN C, TABRIZCHI M, LI H. Ion gating in ion mobility spectrometry: principles and advances[J]. *TrAC*

- Trends in Analytical Chemistry*, 2020, 133: 116-100.
- [11] CHEN H, CHEN C, LI M, WANG W, JIANG D, LI H. Achieving high gating performance for ion mobility spectrometry by manipulating ion swarm spatiotemporal behaviors in the vicinity of ion shutter[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2019, 1 052: 96-104.
- [12] DU Y, WANG W, LI H. Bradbury-Nielsen-gate-grid structure for further enhancing the resolution of ion mobility spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(13): 5 700-5 707.
- [13] GUO K, ZHENG Y, HU H, LIANG J. Simulation study of inverse diffusion counterbalance method for super-resolution ion mobility spectrometry[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2022, 10: 1 004 615.
- [14] HONG Y, LIU S, HUANG C, XIA L, SHEN C, JIANG H, CHU Y. Simultaneous improvement of resolving power and signal-to-noise ratio using a modified hadamard transform-inverse ion mobility spectrometry technique[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2017, 28(11): 2 500-2 507.
- [15] ILBEIGI V, TABRIZCHI M. Peak-peak repulsion in ion mobility spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(8): 3 669-3 675.
- [16] SPANGLER G E. Theory for inverse pulsing of the shutter grid in ion mobility spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(19): 8 052-8 059.
- [17] TABRIZCHI M, JAZAN E. Inverse ion mobility spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(2): 746-750.
- [18] LIU S, HUANG C, SHEN C, JIANG H, CHU Y. A novel driving mode for ion shutter based on alternating current superposition and its application to ion mobility spectrometry[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 211: 102-110.
- [19] 刘升, 黄超群, 沈成银, 储焰南. 非对称离子门控制方法和对离子迁移谱分辨率的改善[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(11): 2 881.
- LIU Sheng, HUANG Chaoqun, SHEN Chengyin, CHU Yannan. Asymmetric control method for ion shutter and the resolution improvement of ion mobility spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(11): 2 881 (in Chinese).
- [20] TADJIMUKHAMEDOV F K, PUTON J, STONE J A, EICEMAN G A. A study of the performance of an ion shutter for drift tubes in atmospheric pressure ion mobility spectrometry: computer models and experimental findings[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(10): 103 103.
- [21] DU Y, WANG W, LI H. Resolution enhancement of ion mobility spectrometry by improving the three-zone properties of the Bradbury-Nielsen gate[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(3): 1 725-1 731.

(收稿日期: 2025-01-21; 修回日期: 2025-02-21)