

行波离子迁移谱的行波脉冲电源设计及应用

李宏¹, 邓辅龙¹, 郭星², 吕炎瞳³, 岳寒露¹,
王如新¹, 杨燕婷⁴, 赵忠俊⁵, 段忆翔¹

(1. 四川大学生命科学学院, 四川 成都 610044; 2. 西北大学化学与材料科学学院, 陕西 西安 710127;

3. 四川大学化学工程学院, 四川 成都 610044; 4. 成都艾立本科技有限公司, 四川 成都 611930;

5. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610044)

摘要:基于行波的无损离子操作结构装置(TW-SLIM)是一种新型的可实现复杂气相离子操作的离子漂移管,是行波离子迁移谱(TWIMS)的核心器件,其利用行波脉冲电源提供振荡电场实现离子传输和分离。针对行波无损离子操作结构特性,采用现场可编程逻辑门阵列(FPGA)作为行波脉冲信号源,使用集成半桥驱动器作为栅极驱动,以金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)构成的半桥拓扑电路作为脉冲输出级,使用可调高压电源作为半桥电路的直流母线电源,设计了一种行波脉冲电源。脉冲电源输出脉冲电压最大频率可达 100 kHz,峰-峰值可达 200 V,上升时间和下降时间均小于 20 ns。在实验室自制的行波离子迁移谱仪器平台上测试了行波幅值和频率对离子传输和离子分离的影响。结果表明,当频率为 10 kHz、幅值为 35 V 时,六(2,2-二氟乙氧基)磷腈的传输效率最高;在行波幅值不变时,随着行波频率的增大,离子信号强度减小。利用六(2,2-二氟乙氧基)磷腈和六(1H,1H,3H-全氟丙氧基)磷氮烯探究行波幅值和频率对离子基于结构分离情况的影响,在行波幅值不变时,随着行波频率增大,对 2 种离子的分离能力变强;在频率不变时,随着行波幅值增大,对 2 种离子的分离能力变弱。实验结果为行波离子迁移谱中的离子传输与分离机制提供了基本理解,该行波脉冲电源对于高分辨率 TWIMS 研发具有重要价值。

关键词:行波离子迁移谱(TWIMS);无损离子操作结构;行波脉冲电源;半桥电路

中图分类号:O657.63

文献标志码:A

文章编号:1004-2997(2022)05-0679-08

doi:10.7538/zpzb.2021.0179

Design and Application of a Traveling Wave Pulse Power Supply for Traveling Wave Ion Mobility Spectrometry

LI Hong¹, DENG Fu-long¹, GUO Xing², LYU Yan-tong³, YUE Han-lu¹,
WANG Ru-xin¹, YANG Yan-ting⁴, ZHAO Zhong-jun⁵, DUAN Yi-xiang¹

(1. College of Life Science, Sichuan University, Chengdu 610044, China;

2. College of Chemistry and Materials Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610044, China;

4. Chengdu Aliben Technology Co., Ltd., Chengdu 611930, China;

5. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610044, China)

Abstract: Ion mobility (IM) coupled mass spectrometry (MS) is a versatile tool for analytical separations, characterization, and detection by measuring collision cross-

sections and mass-to-charge (m/z) ratios. Traveling wave (TW)-based structures for lossless ion manipulations (TW-SLIM) is an innovative ion drift tube for complex gas phase ion manipulations, which is the key component of traveling wave ion mobility spectrometry (TWIMS). TW-SLIM combines flexible ion path design and traveling wave technology. The traveling wave pulse power supply is used to provide an oscillatory electric fields. Ions in TWIMS are propelled and separated by traveling wave. The operating pressure, TW amplitude and TW frequency of TW pulse have effect on ion motion in TWIMS. In this work, a traveling wave pulse power supply was developed, which mainly consisted of field programmable gate array (FPGA), half-bridge gate driver integrated circuit (IC), metal-oxide-semiconductor field effect transistor (MOS-FET), adjustable high voltage module and external trigger signal. The frequency of TW pulse power supply was up to 100 kHz, both rising edge and falling edge were less than 20 ns. The influence of TW amplitude and TW frequency on ions transmission and separation was explored on the home-built instrument platform. The experimental results presented here provide a fundamental understanding of the transmission and separation mechanism in TWIMS. The maximum signal intensity of hexakis (2, 2-difluoroethoxy) phosphazene was at amplitude of 35 V and frequency of 10 kHz. As the traveling wave frequency increased at a fixed traveling wave amplitude, signal intensity of hexakis (2, 2-difluoroethoxy) phosphazene decreased. Ions separations was positively related to frequency when traveling wave amplitude was fixed, while traveling wave amplitude was opposite. The development of traveling wave pulse power supply is valuable for research and development of high resolution TWIMS instrument.

Key words: traveling wave ion mobility spectrometry (TWIMS); structures for lossless ion manipulations; traveling wave pulse power supply; half-bridge circuit

离子迁移谱 (ion mobility spectrometry, IMS) 是利用电场推动分析物通过充满缓冲气体的漂移管, 基于离子尺寸和形状实现气相离子分离^[1]的方法, 已被证明在化学战剂^[2]、爆炸物^[3]和污染物^[4]等方面具有应用价值。近年来, 离子迁移谱与质谱 (mass spectrometry, MS) 的兼容连通性以及离子迁移谱-质谱 (IMS-MS) 平台的商业化受到临床和食品分析等领域研究人员的关注, 在蛋白质^[5]、糖类^[6]、代谢组学^[7]、脂质^[8]检测分析中得到了应用。现有的离子迁移谱包括传统的漂移管离子迁移谱 (drift tube ion mobility, DTIMS)^[9]、场不对称离子迁移谱 (field-asymmetric ion mobility, FAIMS)^[10]、微分子离子迁移谱 (differential mobility spectrometry, DMS)^[11]、捕集迁移谱 (trapped ion mobility spectrometry, TIMS)^[12] 和行波离子迁移谱 (traveling wave ion mobility spectrometry, TWIMS)^[13]。

提高离子迁移谱的分辨率具有重要意义。传统的 DTIMS 性能受所施加电场最大场强和线性漂移管长度的制约, 通过提高漂移管电压来提高电场强度存在电压击穿的现象, 同时线性漂移管长度过长也不切实际。基于无损离子操作结构的行波离子迁移谱 (structures for lossless ion manipulations-based TWIMS, SLIM TWIMS) 作为现有离子迁移谱中的一种, 将 TWIMS 技术^[13] 使用低幅值电压提供电场的优点与无损离子操作结构^[14-15] 易在紧凑空间实现超长路径的优势相结合, 通过增大离子漂移路径提高仪器分辨率。行波无损离子操作结构 (TW-SLIM) 作为 SLIM TWIMS 的核心部件, 使用低幅值的行波电压产生振荡电场以驱动和分离不同种类的离子。与使用恒定电场的 DTIMS 不同, SLIM TWIMS 所施加的行波电压幅值在整个离子路径上固定, 在实现超长路径离子分离装置时, 避免了电压击穿现象和

安全隐患,已成功应用于脂质异构体^[16]、多肽异构体^[17]和多糖异构体^[18]的分离。

行波脉冲电源作为 SLIM TWIMS 的关键部件,用于提供无损离子操作结构所需的振荡电场。本工作将针对 SLIM TWIMS 的工作特性、行波电压的特点,采用可编程逻辑门阵列(FPGA)作为脉冲信号源,金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)组成的半桥拓扑电路作为开关,设计一种行波脉冲电源。将通过 FPGA 输出具有一定时序的脉冲信号控制半桥开关通断,实现直流瞬态电压的产生,为 SLIM 提供电场;并将行波脉冲电源板用于实验室研制的行波离子迁移谱中,研究行波脉冲电源频率和幅值对离子传输和离子分离的影响,以实现该行波脉冲电源可在不同行波电极序列配置下输出不同行波模式的行波电压信号,为 TW-SLIM 装置工作提供所需要的行波电压。

1 电路部分

1.1 基本原理

1.1.1 离子分离原理 Giles 等^[13]提出了行波离子迁移率的概念,并发展了基于环形堆叠电极的行波离子迁移率分离装置;Smith 等^[14]提出了无损离子操作结构,并发展了基于行波的无损离子操作结构装置。在行波离子漂移管装置中,一组行波电极序列由几个行波电极组成,在重复行波电极序列上施加行波电压,利用行波产生随时间和空间变化的电场,驱动离子通过中性缓冲气体并产生迁移率分离。行波沿离子预期的运动方向产生波峰和波谷。离子的运动情况取决于离子运动速度与行波波速的比值^c^[14,19]:

$$c = \frac{KE_{\max}}{s} \quad (1)$$

式中, K 为离子迁移率系数, E_{\max} 为最大场强, s 为行波波速。根据 c 值的不同,离子的运动情况可分为3种:对于 $c \ll 1$,行波对离子的运动影响很小,离子只产生轻微的轴向位移,离子会被有效地捕获在装置内;对于 $c \approx 1$,离子运动速度与波速接近,与波同行;对于 $c > 1$,离子被推向前一个波的波峰。不同的离子被向前驱动时,迁移率较高的离子能够跟上行波,大部分时

间会随波移动;迁移率较低的离子则被行波超越,产生翻滚,被超越的次数越多,离子在漂移管中的运动速度越慢,停留时间越长。迁移率较高的离子大部分时间的运动速度与行波速度相同,未发生分离,只有被行波超越的离子参与迁移率的分离。TWIMS 中的离子迁移率谱图与 DTIMS 产生的相似,高迁移率离子的漂移时间比低迁移率离子的短,TWIMS 与 DTIMS 漂移时间的差异在于 TWIMS 中漂移时间与离子迁移率成二次关系^[19]。

1.1.2 行波无损操作结构装置 TW-SLIM 装置由 1 对包含射频电极、直流保护电极、行波电极的平行对齐的印刷电路板组成,3 种电极在平行平板上的分布示于图 1。

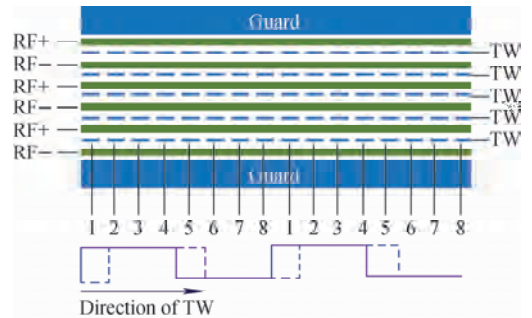


图 1 无损离子操作结构装置电极分布示意图

Fig. 1 Schematic of TW-SLIM device showing the electrodes arrangement

SLIM 装置有 6 个射频电极,相邻的射频电极上施加相位差 180° 的射频电压以产生赝势场,将离子限制在 2 个印刷电路板表面之间。2 个直流保护电极施加直流电压,以限制离子在横向(即 2 个表面之间的侧面)上的扩散。射频电压和直流保护电极电压实现了 2 个维度上的离子限制,防止离子扩散,提高了离子传输效率。在 TW-SLIM 装置中,沿离子运动方向的 8 个行波电极构成 1 个行波序列配置,该行波电极序列配置在整个离子路径上重复,通过在 8 个行波电极序列的每个电极上单独施加高电平或低电平来产生行波。行波模式可以在 10 000 000 和 11 111 110 之间变化,其中 1 代表向特定电极施加高电平、0 代表施加低电平。以行波模式 11 110 000 为例,电极 1~4 施加高电平,5~8 施加低电

平。在实际过程中,施加的电压在离子运动方向上以恒定速度 1 次步进 1 个电极,在下一时刻,电极 2~5 施加高电平,6~8 和 1 施加低电平,以此来产生行波。

1.2 行波脉冲电源电路

为了实现上位机对行波速度、行波电压幅值和行波模式 3 个参数的直接控制和后期仪器整机控制系统的集成,行波脉冲电源系统包括基于可编程逻辑器件(FPGA)电路、模数转换器电路(ADC)与数模转换器电路(DAC)、运算放大电路、MOSFET 栅极驱动电路、金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)电路组成的半桥电路、TW-SLIM 装置。

1.3 主控电路

主控电路包含 FPGA 内部数字电路、FPGA 主控芯片及其外围电路,FPGA 选用 EP4CE。主控电路通过串口电路与上位机通信,接收来自上位机的控制命令,根据控制命令控制高压模块的输出电压值和控制脉冲信号发生电路输出脉冲信号,并将高压模块输出电压检测值返回给上位机。FPGA 内部逻辑电路采用模块化设计,基于 Verilog HDL 语言和 Quartus II 平台开发,根据实际的功能需求,FPGA 内部数字逻辑模块包括实现倍频功能和为其他模块提供时钟信号的锁相环模块、与 PC 通信的串口数据传输模块、缓存控制命令的数据存储模块、多路脉冲信号发生模块、控制 DAC 与 ADC 的 SPI 模块。

1.4 脉冲信号发生电路

本设计通过控制 MOSFET 半桥开关以产生直流瞬态电压,从而为 SLIM 提供振荡电场。每个行波电极需要一路独立的直流瞬态电压为其供电,各个电极之间电平状态变化需要保持同步,有时序上的要求。采用脉冲电压信号给行波电极提供直流瞬态电压,每个行波电极接入一路脉冲信号,通过控制脉冲信号的周期、占空比来实现行波速度和行波模式的控制,通过控制各通道间的相位和输出通道数来适应不同行波电极数目的 SLIM 装置。在本设计中,采用 FPGA 芯片内部脉冲信号发生模块产生脉冲信号控制 MOSFET 通断。脉冲信号发生模块可输出 10 通道脉冲信号,每个脉冲通道输出 2 路互补脉冲信号。

1.5 半桥电路部分

半桥电路由半桥驱动电路和 2 个 MOSFET 组成的半桥拓扑电路组成,半桥驱动电路用于匹配 FPGA 输出电压与 MOSFET 栅极驱动电压。设计所选用的 MOSFET 为 IRFR220N,栅极驱动电压范围为 10~20 V。FPGA 引脚输出电压为 3.3 V,不足以驱动 MOSFET。半桥电路驱动芯片选用英飞凌公司生产的 2ED2181,频率范围在 10~100 kHz 之间,芯片信号输入端与 FPGA 输出的 3.3 V 电平信号兼容,输出端电压范围在 10~20 V 之间,能够很好地驱动 MOSFET 导通。半桥电路示于图 2a, FPGA 输出的脉冲信号经半桥驱动器放

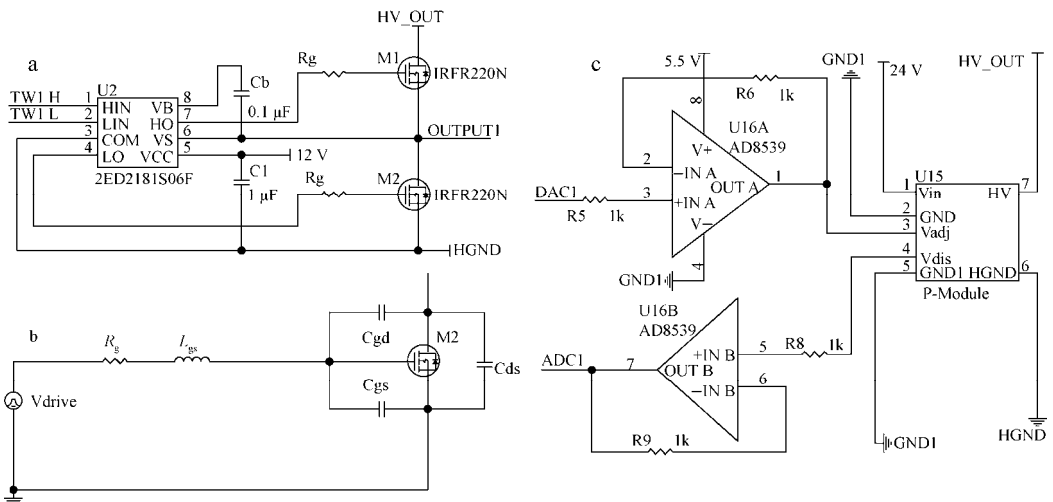


图 2 半桥电路(a),低侧桥臂驱动电路模型(b)和高压电源控制电路(c)

Fig. 2 Half-bridge circuit (a), low side gate drive circuit model (b), high voltage power supply control circuit (c)

大后控制半桥电路中 MOSFET 的导通与关断,从而为行波 SLIM 提供所需的高低电平。

2ED2181 通过自举电路^[20]产生悬浮电压,实现高侧驱动电路供电,内部集成 2 组互补推挽电路以驱动半桥 MOSFET。自举电容 C_b 为栅极驱动器内部高侧开关提供悬浮电压和驱动栅极所需的电荷,设计中自举电容取值为 $0.1 \mu\text{F}$, 25 V 。

2ED2181 栅极驱动引脚信号通过对 MOSFET 输入电容充电,实现 MOSFET 的导通;栅极驱动引脚为低时,电容放电实现 MOSFET 关断。MOSFET 驱动电路模型示于图 2b,其中, L_{gs} 代表 PCB 走线电感, R_g 为栅极驱动电阻。栅极驱动回路为 LCR 电路,寄生电容为 MOSFET 栅极输入电容 C_{iss} ,由 C_{gd} 与 C_{gs} 组成。在典型的二阶 LCR 系统中,系统处于过阻尼时,振荡得到抑制,此时 R_g 应该满足:

$$R_g > 2\sqrt{\frac{L_{gs}}{C_{iss}}} \quad (2)$$

本设计中,PCB 走线路径电感 L_{gs} 通过 Q3D 提取,为 13.41 nH ; C_{iss} 为 300 pF ; 计算得到 R_g 取值应大于 13.38Ω 。考虑到 R_g 值会影响开关过程中电压的上升和下降时间,取值过大, MOSFET 开通和关断速度过慢会使开关损耗增加,因此,驱动电阻 R_g 取值为 15Ω 。

1.6 高压电源部分

行波电压幅值会影响离子通过 SLIM 装置的速度,从而影响不同离子的分离情况。采用 200 V 可调直流高压电源模块接入 MOSFET 半桥电路,作为 MOSFET 半桥电路的直流母线电源,通过调节可调直流高压电源模块输出电压实现行波电压幅值的调节。

直流电源模块的控制电压和检测电压范围均为 $0 \sim 5 \text{ V}$,所需控制精度和检测精度均为 1 V 。设计采用数模转换器(DAC)产生模拟电压控制直流电源模块的输出,高压模块输出电压通过模数转换器(ADC)进行检测。DAC 与 ADC 和高压模块之间采用运算放大器 AD8539 作为缓冲,AD8539 具有较宽的线性范围,同时支持单电压供电。高压电源控制电路示于图 2c。

2 实验部分

2.1 主要实验装置

实验装置主要包括电喷雾电离源、毛细管、离子漏斗、离子门、行波离子迁移谱漂移管和法拉第杯。样品通过注射泵(Fusion 100T, Fisher Scientific)注入离子源。电喷雾电离源由实验室自制,样品经离子源电离后,通过加热不锈钢毛细管将离子引入真空区,真空区示于图 3,使用机械泵(TRP-36, 西安双塔真空设备有限公司产品)抽气。离子离开加热毛细管后,在离子漏斗(实验室自制)处聚焦,并将离子传输至离子门处,经离子门释放后进入漂移管区。

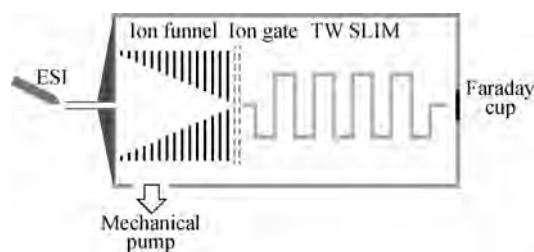


图 3 仪器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the instrumental arrangement

离子漂移管采用印刷电路板制成,离子路径采用 U 型设计,长度为 3.383 m 。离子在离子漂移管处实现离子分离与传输。漂移管射频信号由射频电源(RFP01, 成都艾立本公司产品)提供。离子流信号通过法拉第杯接收,微弱电流信号经放大后,使用泰克示波器(Tektronix-MDO3024)采集波形数据。

2.2 试剂

六(2,2-二氟乙氧基)磷腈(分子质量 621.19)、六(1H,1H,3H-全氟丙氧基)磷氮烯(分子质量 921.23):陕西秦境标准物质科技中心产品;乙腈、甲醇:色谱纯,麦克林公司产品;甲酸:色谱纯,德国 CNW 公司产品。制备浓度为 10 mg/L 六(2,2-二氟乙氧基)磷腈溶液,六(2,2-二氟乙氧基)磷腈溶液与六(1H,1H,3H-全氟丙氧基)磷氮烯按 $1:1$ 制备浓度为 10 mg/L 的混合溶液。

2.3 实验条件

ESI 电离源,正离子模式;电压值 4 kV ;毛细管电压 36 V ;进样流速 $2 \mu\text{L}/\text{min}$;离子漏

斗射频电压峰峰值 133 V, 频率 923 kHz; 离子门脉冲宽度 5 Hz, 离子门打开时间 10 ms; Guard 电极电压 35 V, 漂移管射频电压峰峰值 290 V, 频率 1 057 kHz; 工作气压 100 Pa。

3 结果与讨论

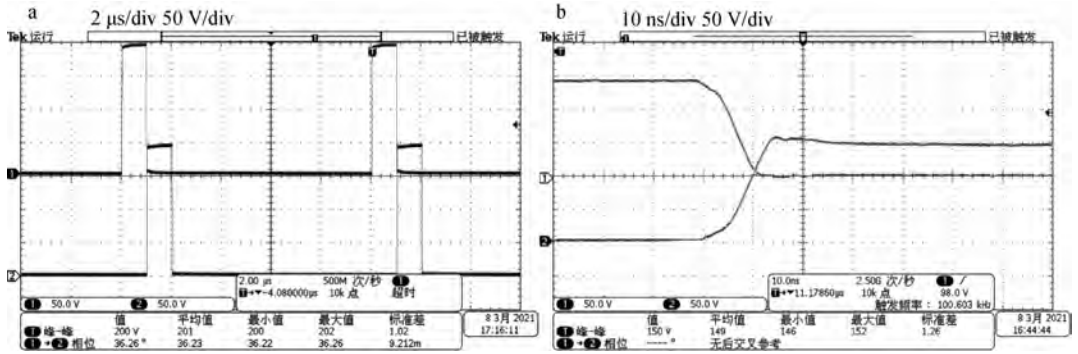
3.1 电源测试

行波脉冲电源脉冲通道输出电压信号通过泰克示波器和具有 10 倍衰减的探头 (TPP0500B) 测量, 其结果示于图 4, 脉冲上升时间和下降时间小于 20 ns, 峰-峰值达 200 V。

3.2 行波幅值和频率对离子传输的影响

使用 10 mg/L 六(2,2-二氟乙氧基) 磷腈

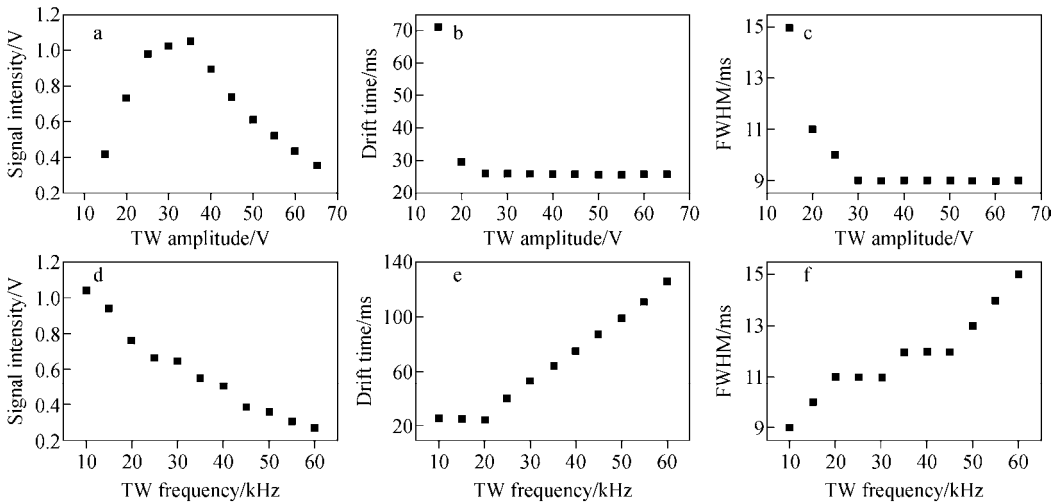
溶液研究行波幅值对离子传输影响时, 固定行波脉冲电源频率为 10 kHz, 行波幅值在 15~65 V 之内, 5 V 为步进, 以离子门打开时刻作为 0 点。离子信号强度随行波幅值增大而增大, 15 V 时的信号强度为 414 mV, 35 V 时达到最大, 为 1 046 mV; 随着行波幅值的增大, 信号强度逐渐减小, 65 V 时的信号强度为 355 mV, 示于图 5a。在较低的行波幅值下, 有效电势较小, 行波电场对离子的捕获能力较弱, 传输效率较低; 随着行波幅值增大, 电场增大, 离子获得了较大的能量, 产生碰撞散射或碰撞裂解, 导致离子信号强度逐渐减小, 示于图 5b。随着行波电压增大, 离子漂移时间减小, 当行波电压大于



注: a. 相邻两通道输出结果; b. 上升沿和下降沿

图 4 脉冲波形

Fig. 4 Pulse waveforms



注: a. 不同行波幅值下的信号强度图; b. 不同行波幅值下的漂移时间图; c. 不同行波幅值下的半峰宽图;

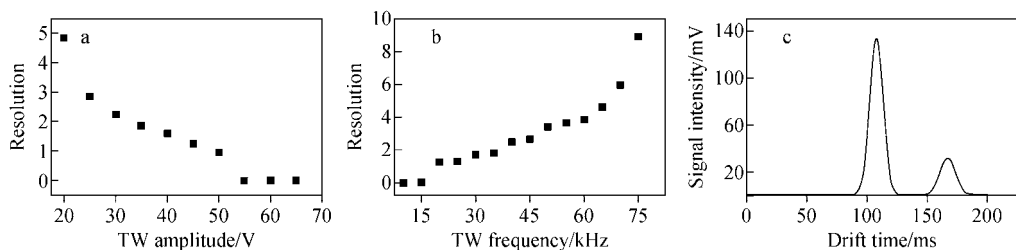
d. 不同频率下的信号强度图; e. 不同频率下的漂移时间图; f. 不同频率下的半峰宽图

图 5 行波对离子传输的影响

Fig. 5 Influence of traveling wave on ions transmission

或等于 25 V 时,离子漂移时间不再变化,即离子速度与行波速度相同,离子不发生翻滚现象,示于图 5c。低行波幅值下,离子有较长的漂移时间,而且会发生离子扩散效应,导致较大的峰展宽。

研究行波频率对离子传输影响时,行波幅值为 35 V,频率范围为 10~60 kHz,以 5 kHz 为步进。离子信号强度随行波频率的增大而逐渐减小,60 kHz 时的信号强度为 253 mV,示于图 5d。当行波频率小于或等于 20 kHz 时,离子运动速度与行波速度相同;当行波频率大于 20 kHz 时,离子漂移时间随行波频率增大而增大,离子翻滚事件随行波频率增大而增多,行波频率增大使离子产生更长的漂移时间,同时产生离子扩散效应,导致更大的峰展宽,示于图 5e,5f。



注:a. 行波幅值;b. 行波频率;c. 混合样品离子迁移率谱图

图 6 行波对离子分离能力的影响

Fig. 6 Influence of traveling wave on ions separation power

4 结论

根据行波无损离子操作结构的工作特性,本文设计了一种用于行波离子迁移谱的行波脉冲电源。电源主要包括主控部分、脉冲信号发生部分、半桥电路开关部分和行波无损离子操作结构等,通过改变行波幅值和频率实现不同离子的传输与分离。实际测试表明,电源输出脉冲上升时间和下降时间小于 20 ns,输出脉冲波形平滑。最后,将行波电源用于仪器平台,研究行波幅值和行波频率对离子传输和离子分离的影响。结果表明,在 35 V 时,离子传输效率最高。行波频率和行波幅值对离子分离的影响符合行波离子迁移谱的离子分离原理,提高行波频率可以获得较好的分离能力。实验结果为行波离子迁移谱中的离子传输与分离机制提供了基本理解。该行波脉冲电源为行波离子迁移

3.3 行波幅值和频率对离子分离的影响

本研究采用 10 mg/L 六(2,2-二氟乙氧基)磷腈和六(1H,1H,3H-全氟丙氧基)磷氮烯的混合溶液进行分析。研究行波幅值对离子分离的影响时,固定行波频率为 25 kHz;研究行波频率对离子分离的影响时,固定行波幅值为 35 V。随着行波幅值的增大,仪器对离子的分离能力减小,行波幅值为 55 V 时,离子不再发生分离,即 2 种离子的运动速度与行波速度相同,不发生分离,同时离开 SLIM 装置,示于图 6a。不同行波频率对离子分离的影响情况示于图 6b,在频率较低时,2 种离子的运动速度与行波速度相同,不发生分离,同时离开 SLIM 装置,随着行波频率的增大,仪器对离子的分离能力增强。在行波频率 25 kHz、幅值 20 V 时,混合溶液的漂移时间谱图示于图 6c,半峰宽分别是 13 和 15.7 ms。

谱仪的设计研发奠定了电源基础,对后续仪器研发具有重要意义。

参考文献:

- [1] LANUCARA F, HOLMAN S W, GRAY C J, EYERS C E. The power of ion mobility-mass spectrometry for structural characterization and the study of conformational dynamics[J]. *Nature Chemistry*, 2014, 6(4): 281-294.
- [2] STEINER W E, HARDEN C S, HONG F, KLOPSCH S J, HILL H H, MCHUGH V M. Detection of aqueous phase chemical warfare agent degradation products by negative mode ion mobility time-of-flight mass spectrometry [IM(tof)MS][J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2006, 17(2): 241-245.
- [3] KIRK A T, BOHNHORST A, RADDATZ C R,

- ALLERS M, ZIMMERMANN S. Ultra-high-resolution ion mobility spectrometry-current instrumentation, limitations, and future developments[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2019, 411(24): 6 229-6 246.
- [4] DAI J, ZHAO Z, LIANG G, DUAN Y. A novel microwave-induced plasma ionization source for ion mobility spectrometry[J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 44 051.
- [5] ZHONG Y, HYUNG S J, RUOTOLO B T. Ion mobility-mass spectrometry for structural proteomics[J]. *Expert Rev Proteomics*, 2012, 9 (1): 47-58.
- [6] MORRISON K A, CLOWERS B H. Contemporary glycomic approaches using ion mobility-mass spectrometry[J]. *Curr Opin Chem Biol*, 2018, 42: 119-129.
- [7] LEVY A J, ORANZI N R, AHMADIRESKETY A, KEMPERMAN R H J, WEI M S, YOST R A. Recent progress in metabolomics using ion mobility-mass spectrometry[J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 116: 274-281.
- [8] ZHENG X, SMITH R D, BAKER E S. Recent advances in lipid separations and structural elucidation using mass spectrometry combined with ion mobility spectrometry, ion-molecule reactions and fragmentation approaches[J]. *Curr Opin Chem Biol*, 2018, 42: 111-118.
- [9] ARMENTA S, ESTEVE-TURRILLAS F A, ALCALÀ M. Analysis of hazardous chemicals by “stand alone” drift tube ion mobility spectrometry: a review[J]. *Analytical Methods*, 2020, 12 (9): 1 163-1 181.
- [10] KOLAKOWSKI B M, MESTER Z. Review of applications of high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry (FAIMS) and differential mobility spectrometry (DMS)[J]. *Analyst*, 2007, 132(9): 842-864.
- [11] KREBS M D, ZAPATA A M, NAZAROV E G, MILLER R A, COSTA I S, SONENSHEIN A L, DAVIS C E. Detection of biological and chemical agents using differential mobility spectrometry (DMS) technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(4): 696-703.
- [12] JEANNE DIT FOUQUE K, FERNANDEZ-LIMA F. Recent advances in biological separations using trapped ion mobility spectrometry-mass spectrometry[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 116: 308-315.
- [13] GILES K, PRINGLE S D, WORTHINGTON K R, LITTLE D, WILDGOOSE J L, BATEMAN R H. Applications of a travelling wave-based radio-frequency-only stacked ring ion guide[J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2004, 18(20): 2 401-2 414.
- [14] IBRAHIM Y M, HAMID A M, DENG L, GARIMELLA S V, WEBB I K, BAKER E S, SMITH R D. New frontiers for mass spectrometry based upon structures for lossless ion manipulations[J]. *Analyst*, 2017, 142(7): 1 010-1 021.
- [15] TOLMACHEV A V, WEBB I K, IBRAHIM Y M, GARIMELLA S V, ZHANG X, ANDERSON G A, SMITH R D. Characterization of ion dynamics in structures for lossless ion manipulations[J]. *Anal Chem*, 2014, 86(18): 9 162-9 168.
- [16] WOJCIK R, WEBB I K, DENG L, GARIMELLA S V, PROST S A, IBRAHIM Y M, BAKER E S, SMITH R D. Lipid and glycolipid isomer analyses using ultra-high resolution ion mobility spectrometry separations[J]. *Int J Mol Sci*, 2017, 18(1): 183-194.
- [17] NAGY G, KEDIA K, ATTAH I K, GARIMELLA S V B, IBRAHIM Y M, PETYUK V A, SMITH R D. Separation of beta-amyloid tryptic peptide species with isomerized and racemized l-aspartic residues with ion mobility in structures for lossless ion manipulations[J]. *Anal Chem*, 2019, 91(7): 4 374-4 380.
- [18] NAGY G, ATTAH I K, GARIMELLA S V B, TANG K, IBRAHIM Y M, BAKER E S, SMITH R D. Unraveling the isomeric heterogeneity of glycans: ion mobility separations in structures for lossless ion manipulations[J]. *Chem Commun (Camb)*, 2018, 54(83): 11 701-11 704.
- [19] SHVARTSBURG A A, SMITH R D. Fundamentals of traveling wave ion mobility spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2008, 80 (24): 9 689-9 699.
- [20] SEIDEL A, COSTA M S, JOOS J, WICHT B. Area efficient integrated gate drivers based on high-voltage charge storing[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2015, 50(7): 1 550-1 559.
- (收稿日期:2021-10-25;修回日期:2021-12-24)