

用于高场非对称波形离子迁移谱的高压射频方波电源研究

朱辰霄¹, 李 鹏^{1,2}, 李灵锋^{1,2}, 张允晶¹, 周 文³

(1. 苏州大学电子信息学院, 江苏 苏州 215006; 2. 苏州微木智能系统有限公司, 江苏 苏州 215000;

3. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 高压射频脉冲电源是高场非对称波形离子迁移谱(FAIMS)的核心部件。为充分发挥 FAIMS 利用交替的高低电场下离子不同运动特性的分离机制, 本文基于半桥拓扑电路, 采用新一代的高压超级结-金属-氧化物半导体场效应晶体管(SJ MOS)作为电源核心器件, 设计了一款高压射频方波电源。实验测试结果表明, 该电源输出波形接近理想方波, 峰-峰值达 506 V, 频率达 1 MHz, 功耗仅 29 W。将该电源与实验室自建的 FAIMS 核心系统结合, 通过对样品气体丙酮、水杨酸甲酯进行检测, 研究 FAIMS 谱图特点与分离电压幅值、电源频率、载气流量的关系。结果表明, 提升分离电压幅值能明显改善 FAIMS 分辨率, 但会损失较大的灵敏度; 通过增大电源频率能够在轻微损失分辨率的情况下有效提升 FAIMS 灵敏度; 此外, 增加载气流量也能改善灵敏度。本文设计的 FAIMS 分离电源具有高压高频输出、波形质量好、功耗低的特点, 能稳定支持 FAIMS 进行离子筛选与分辨, 对 FAIMS 小型化发展有实用价值。

关键词: 高场非对称波形离子迁移谱(FAIMS); 高场射频电源; 分辨率; 灵敏度

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2025)04-0403-10

DOI: 10.7538/zpxb.2024.0190

CSTR: 32365.14.zpxb.2024.0190

Study of a High-voltage RF Square-wave Power Supply for High-field Asymmetric Waveform Ion Mobility Spectrometry

ZHU Chen-xiao¹, LI Peng^{1,2}, LI Ling-feng^{1,2}, ZHANG Yun-jing¹, ZHOU Wen³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Suzhou Weimu

Intelligent System Corporation, Suzhou 215000, China; 3. China National Armaments and Equipment Group

Automation Research Institute Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: High-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry (FAIMS) is a chemical analytical technique that utilizes the difference in ion mobility of ions at alternating high-low electric field strengths for ion separation. FAIMS has the advantages of working at atmospheric pressure, easy on-site detection and high portability. High voltage RF pulse power supply is the core component of FAIMS, which will directly affect the sensitivity and resolving power. In order to give full play to the dispersion mechanism of FAIMS, a high-voltage RF square-wave power supply was designed based on a half-bridge topology circuit using a new generation of high-voltage super junction metal oxide

semiconductor field effect transistor (SJ MOS) as the core device of the power supply. The measurements showed that the output waveform of the power supply is close to an ideal square wave, with a peak-to-peak value of 506 V, a frequency of 1 MHz, and a power consumption of only 29 W. The power supply was combined with the house-made FAIMS core system to detect the gas samples such as acetone and methyl salicylate. Based on this system, the relationship between the resolving power and sensitivity of FAIMS and the amplitude of the separation voltage, the frequency of the power supply and the flow rate of the carrier gas were studied. The results showed that increasing the dispersion power supply amplitude significantly improves the FAIMS resolving power with a large loss of sensitivity, increasing the power supply frequency effectively improves the sensitivity with a slight loss of FAIMS resolving power. When the frequency is raised to 1 MHz, the peak height of methyl salicylate increases to 228% of that at 400 kHz, while the resolving power decreases to only 89% of that at 400 kHz. In addition, increasing the carrier gas flow rate also improves the sensitivity, but with a corresponding loss of resolving power. This study demonstrated the reciprocal trade-off between the resolving power and sensitivity of FAIMS. Therefore, when selecting FAIMS parameters, these two key performance indicators must be considered comprehensively, which also provides a reference for the optimization of FAIMS. The FAIMS dispersion power supply designed in this work is characterized by high voltage and high frequency output, good waveform quality and low power consumption, which can stably support FAIMS for ion selection and dispersion, and is of practical value for the development of FAIMS miniaturization and field detection.

Key words: high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry (FAIMS); high-field radio frequency power supply; resolving power; sensitivity

高场非对称波形离子迁移谱(FAIMS)是一种由离子迁移谱演变而来的化学分析技术,其利用离子在高、低强度电场下离子迁移率 K 的差异,对不同物质进行筛选分离^[1-2],具有灵敏度高、便携、集成度高和制造成本低的优点^[3-4]。

低电场强度下,离子迁移率 K_0 与电场强度无关;然而,在高电场强度($E > 11\ 000\ \text{V/cm}$)下,高场迁移率 K_{high} 随电场强度改变呈非线性变化,且不同离子的改变特性不同。 K_{high} 与有效迁移率系数 $\alpha(E/N)$ 有关,不同类型的离子在FAIMS中的轨迹示意图示于图1。在高电场 t_1 和低电场 t_2 交替周期内,由于离子的 K_{high} 与 K_0 具有差异,离子在垂直方向产生周期位移差。 $\alpha(E/N) > 0$ 的离子位移差大于0,会不断上升; $\alpha(E/N) = 0$ 的离子不产生净位移差; $\alpha(E/N) < 0$ 的离子位移差小于0,会不断下降。在迁移管内,水平气流和垂直脉冲的共同作用下,离子会呈Z字形的运动轨迹^[5-8];在两极板间再施加补偿电压(CV),可使原本碰撞到分离通道壁的离子发生偏转,从而通过迁移区被后端检测器检测。

FAIMS是基于非对称脉冲方波的周期内电

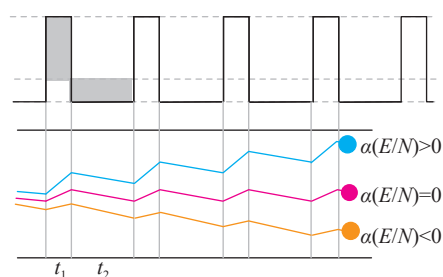


图1 FAIMS 迁移区内不同离子的运动轨迹与 FAIMS 电压波形示意图

Fig. 1 Trajectories of different ions within the FAIMS drift zone and FAIMS voltage waveform schematic

压与时间积分为零设计的,所以实际分离电源波形越接近理想非对称方波,离子在迁移区的垂直位移就越精确,FAIMS 的分离效果就越强,且分离电源频率越高,FAIMS 灵敏度越高^[9-10]。Krylov 等^[11]研究表明,采用接近矩形的分离电压波形能有效提高 FAIMS 的分辨率,但设计难点是需要耐压更高的高压设备与更复杂的功耗优化、散热设计。目前,常用的技术路径是多次波形叠

加、反激升压和多硅基金属-氧化物半导体场效应晶体管(Si MOS)串联半桥^[12]。其中,多次波形叠加电路易受电容、电感的干扰,导致各子波形难以精确叠加;反激升压的输出峰值电压高、功耗低,但波形与理想方波存在差异,且反激变压器的设计较复杂。在多 Si MOS 串联半桥方面,2008 年,清华大学唐飞等^[13]率先提出并设计了 2 000 V/200 kHz 半桥方波电源;2012 年,电子科技大学李茂等^[14]设计了功耗为 90 W 的 2 000 V/200 kHz 非对称半桥脉冲电源;2021 年,清华大学钟伦超等^[15]设计了 1 种三桥臂差分式的方波电路,降低了对直流电源的需求,能够输出 1 660 V/189 kHz 非对称方波。但这些电源大多以传统 Si MOS 为基础,在波形质量、功耗、频率方面还有提升空间。

基于此,本文采用新一代高压超级结金属-氧化物半导体场效应晶体管(SJ MOS)设计半桥逆变电路,利用 SJ MOS 具有更低的导通损耗、开关损耗的特点,结合半桥拓扑的快速斩波能力,使电源输出接近方波的高压射频分离电压,并进一步优化高压射频脉冲电源的波形质量、频率、峰-峰值和鲁棒性。另外,以该分离电源为核心,结合实验室自制的 FAIMS 分离通道搭建系统,研究分离电压峰-峰值、射频频率、载气流量对 FAIMS 谱图的影响。

1 系统设计

1.1 FAIMS 电路部分

1.1.1 FAIMS 高压射频电源主电路结构设计

本文设计的 FAIMS 分离电源采用逆变半桥拓扑结构,示意图示于图 2。其中, Q_1 、 Q_2 分别

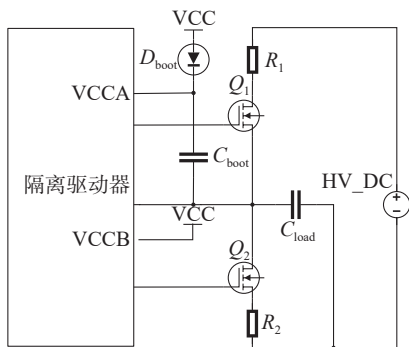


图 2 高场射频脉冲电源结构图

Fig. 2 Structure diagram of high-field RF pulse power supply

为上桥、下桥的 SJ MOS, HV_DC 代表高压直流源, C_{load} 为 FAIMS 分离通道金属极之间的等效电容, C_{boot} 为上桥驱动的自举电容, R_1 、 R_2 为限流电阻。当 Q_1 导通时, C_{load} 电位会被拉至高压 HV_DC 电压轨;当 Q_2 导通时, C_{load} 电位会被拉至低电压轨,由此,FAIMS 分离通道上就产生了高低电压切换的脉冲波。自举电容 C_{boot} 为 Q_1 提供稳定的栅源压差 V_{GS} , 当 Q_1 导通、 Q_2 关闭时,源端电位会变为 HV_DC, 若上桥驱动依旧采用 VCC 作为供电位,此时, V_{GS} 为负电压差,不符合 MOS 管开启要求。当添加 C_{boot} 后,在 Q_1 导通、 Q_2 关闭时, C_{boot} 能维持两端电压差不突变,将上桥驱动供电位抬升至 HV_DC+VCC, 维持 Q_1 处于开启状态。

1.1.2 高压半桥电路设计 FAIMS 高压高频电源不仅要为迁移区的等效电容充电,还要为开关回路上的寄生电容充电,开关管自身存在寄生电容(C_{iss} 、 C_{oss}),且走线均存在与线宽、铜厚相关的等效电容^[16]。随着 FAIMS 电源布局趋向小型化、工作趋向高压高频化,这会造成不容忽视的非理想功耗。对寄生电容充放电功率 P_{stray} 进行分析,公式如下:

$$P_{stray} = C_{stray} U^2 f \quad (1)$$

式中, C_{stray} 为寄生电容, U 为电压峰值, f 为脉冲频率。

可见,优化 C_{stray} 对改善 FAIMS 功率、降低系统温度具有重要作用。本文对电路布局进行优化,采用短粗布局优化主回路,将 SJ MOS 尽可能靠近布局,并增大主回路与旁路的间距。同时,对自举回路中自举二极管 D_{boot} 、自举电容 C_{boot} 的选型与取值进行优化, D_{boot} 采用正向压降低的快恢复二极管,能够显著减少自举回路的导通损耗。本文采用 ROHM 公司制造的 RFN1LAM6STR 二极管,其反向恢复时间为 25 ns,正向压降和反向压降分别为 1.15、600 V,可满足 FAIMS 分离电源高压高频的设计需求。 C_{boot} 采用 X7R 材质的 50 V/33 nF 电容。

用于 FAIMS 的分离电源需要高输出电压,因此,半桥结构的 MOS 管功耗设计非常重要。MOS 管开启期间,输入电容 C_{iss} 和驱动回路电阻会消耗能量,随后在关断期间释放在开启期间 C_{iss} 存储的能量,构成了 MOS 管的开关损耗^[17]。MOS 管在完全导通后,由于存在非零的导通电阻 $R_{ds(on)}$,流过电流时会产生压降,从而产生导通

功耗 E_{cond} 。MOS 管的开关功耗 $E_{\text{on_total}}$ 和导通功耗 E_{cond} 计算公式如下^[18-20]:

$$E_{\text{on_total}} = \int (V_{\text{DD}} - V_{\text{GS}}) dQ_g + \int V_{\text{GS}} dQ_g = V_{\text{DD}} Q_g \quad (2)$$

$$E_{\text{cond}} = t_{\text{cond}} (V_{\text{TH}} I_D + R_{\text{ds(on)}} I_D^2) \quad (3)$$

式中, V_{DD} 为栅极驱动器电压, V_{GS} 为栅源压差, Q_g 为导通 MOS 管时注入到栅极电极的电荷量, t_{cond} 为 MOS 管的导通时间, V_{TH} 为阈值电压, I_D 为流过 MOS 管的漏电流。

由式(2)、(3)可知, MOS 管的栅极电荷 Q_g 和导通电阻 $R_{\text{ds(on)}}$ 对 FAIMS 脉冲电源的损耗有着决定性影响。 Q_g 越小, 开启关断过程中的功耗越少, 从而提高了开关速度和能量转换效率; $R_{\text{ds(on)}}$ 越小, 导通过程中的功耗越少。本文基于图 2 的电源拓扑结构, 选用新式开关器件高压 SJ MOS 作为 FAIMS 脉冲电源的核心器件。与传统 Si MOS 相比, SJ MOS 通过在其漂移区嵌入交替排列的 P 型和 N 型半导体层, 创建了多个垂直 PN 结, 当施加电压时, 这种结构可以有效减少 Q_g 和 $R_{\text{ds(on)}}$ 。在设计半桥电路的驱动电路时, 需要考虑其具备快速驱动 MOS 管与隔离保护的能力。因此, 本文选择德州仪器公司生产的隔离式双通道栅极驱动器 UCC21520DWR。在供电 12 V、输出负载电容 1.8 nF 时, 该驱动芯片上升时间为 6 ns、下降时间为 7 ns, 峰值输出电流为 6 A, 具备快速切换的能力。同时, 该驱动

器能提供 5.7 kV_{RMS} 的电压隔离强度, 可有效隔离射频电源的低压侧和高压侧。此外, 为了防止射频电源因上、下桥 MOS 管的导通延时而短路, 将驱动电路死区时间设置为 10 ns, 这样兼顾了 FAIMS 电源的高频切换和稳定性。另外, 为了优化该 FAIMS 电源的热稳定性, 本文在 SJ MOS 附近紧密布局了大量 U 形散热片, 该散热片由导热性能更好的铜制成, U 型布局可以提高有效散热面积。基于上述思路设计的高压射频脉冲电源实物图示于图 3, 模块尺寸仅为 13 cm × 11.7 cm。

1.2 FAIMS 系统搭建

利用干燥过滤装置、进样装置、⁶³Ni 离子源、FAIMS 分离通道和法拉第盘离子检测器搭建完整的 FAIMS 系统, 示于图 4。直流补偿电压 CV 扫描步长设置为 50 mV, 范围设置为 20 V; 用于放大输出法拉第盘捕获的 pA 级电流信号的微静电计采用自制的增益为 20 G, 带宽为 4 kHz 的跨阻运算放大电路; AD 转换器采用美国国家仪器公司(NI)生产的 USB 6210 数据采集卡。

1.2.1 仪器与设备 气泵与滤芯: 采用上海蓬普有限公司生产的 G4BL1260S 型气泵, 将环境空气推过分子筛滤芯后生成干燥洁净的空气载气; 进样装置: 采用薄膜进样, 薄膜材料为聚二甲基硅氧烷(PDMS), 80 °C 恒温加热; 离子源: 采用能量聚焦集中的套筒状放射电离源, 将薄膜 10 mCi 的 ⁶³Ni 涂敷在套筒内部, 该放射电离源可发射出

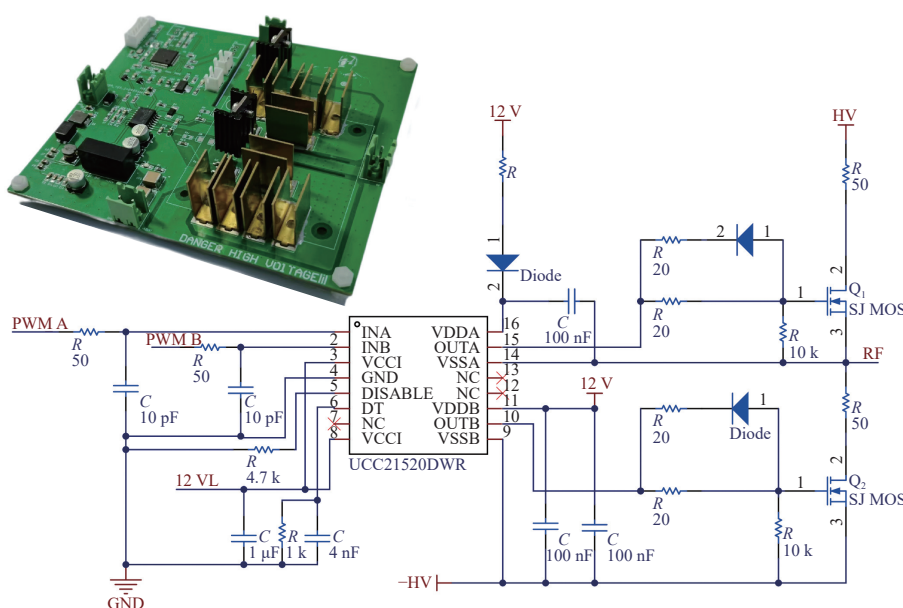


图 3 高压射频脉冲电源原理图与实物图

Fig. 3 Schematic diagram and physical picture of high voltage RF pulse power supply

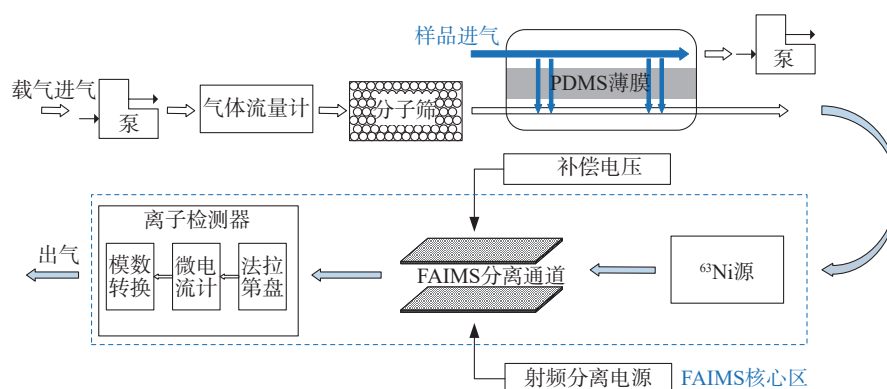


图4 FAIMS系统结构示意图

Fig. 4 Structure schematic of FAIMS system

平均能量为 17 keV 的电子, 电子与空气中的气体分子发生持续碰撞产生离子, 在最终的离子产物中, 正离子一般为 $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$, 负离子一般为 $\text{CO}_4^-(\text{H}_2\text{O})_n$, 这些离子随后参与目标物的离子-分子反应过程; 分离通道: 利用慢走丝工艺在长度 5 mm 的钨钢金属体上加工出高度 120 μm 、长宽比为 42 的叉指状分离通道, 在有效降低对电源和外围气路设计要求的同, 避免了分离通道的电荷累积效应, 该分离通道与离子源等组成 FAIMS 核心区, 示于图 5; 电路仪器: 采用上海蚯蚓电子公司生产的 CE0600010T 高压直流电源供电, 最大输出电压为 600 V, 最大输出电流为 1 A; 示波器: 采用深圳市鼎阳科技有限公司生产的 SDS2352X-E 示波器, 带宽为 350 MHz, 分辨率为 8 位, 具有完整捕获高压射频波形的能力; 探针: 采用 Cleqee 生产的 P4100 无源探针, 衰减倍率 $\times 100$, 带宽 100 MHz, 输入电容 6 pF。

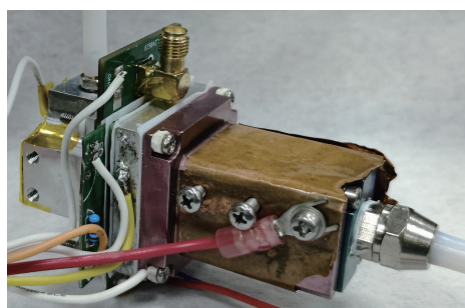


图5 FAIMS核心系统

Fig. 5 Core system of FAIMS

1.2.2 实验试剂 丙酮(纯度 99.5%): 永华化学股份公司产品; 水杨酸甲酯(纯度 98%): 国药集团化学试剂有限公司产品。

2 结果与讨论

2.1 高压射频脉冲方波电源实验

对图 3 中的高压射频电源实物进行测试, 输出波形示于图 6。脉冲波形的峰-峰值为 506 V, 频率为 1 MHz, 上升时间为 26 ns、下降时间为 22 ns, 具有输出电压值高、开关切换速度快的能力; 在 506 V/1 MHz 条件下的工作电流为 57 mA, 总功率仅为 29 W, 其上升、下降沿的尖峰过激均小于 1.6%, 波形完整性较优; 输出的脉冲波形峰值平稳, 一致性表现优异, 与 FAIMS 理想工作条件中的脉冲方波接近, 符合 FAIMS 的设计需求。当工作频率为 1 MHz 时, 电源能输出峰-峰值 0~506 V 可调的宽电压范围脉冲方波, 且不同峰-峰值条件下的输出波形均具有较好的一致性。电源工作频率和占空比由微处理器生成的脉宽调制信号(PWM)控制, 该信号可快速调节电源频率在 1 Hz~1 MHz 范围内变化。

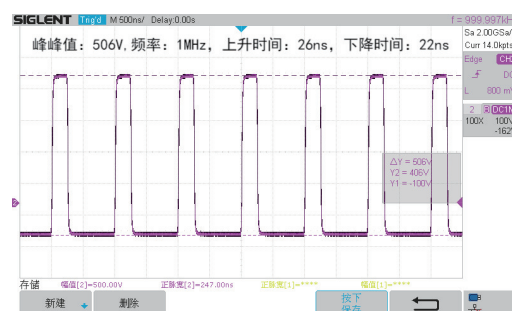


图6 高压射频电源输出方波脉冲波形图

Fig. 6 Square wave pulse waveform output from high voltage RF power supply

2.2 FAIMS 样品气体检测实验

利用图 4 的 FAIMS 系统进行气体检测实验, 设置载气流量为 2.5 L/min, 配置系统为阳离

子模式;设置分离电压(DV)的峰-峰值以 40 V 步长递增,使 FAIMS 迁移区内分离场强步进至 33 000 V/cm,对空气载气、丙酮、水杨酸甲酯进行谱图扫描,示于图 7。可见,水杨酸甲酯、丙酮与空气载气在峰位置、峰强度、峰宽度方面明显不同,验证了使用本文设计的高场射频方波脉冲分离电源的 FAIMS 系统在分辨物质方面的有效性。

从图 7c 可以看出,在射频分离电压幅值达到 330 V 时,丙酮的谱图出现双峰特征,随着射频分离电压幅度的增大,特征双峰的距离拉大,分辨更清晰。这主要是因为离子的高场迁移率 K_{high} 和低场迁移率 K_0 的比例差异 K_{high}/K_0 决定了筛选特定离子所需的补偿电压(CV)。更高的分离电场场强会大幅改变 K_{high}/K_0 ,需要施加幅度更大的 CV 才能使特定离子通过迁移区被法拉第盘捕获,最终在谱图相应的 CV 轴上得到电信号^[21-22]。

2.3 射频电压幅值对 FAIMS 灵敏度和分辨能力的影响

通过分辨率 R 评估 FAIMS 的分辨能力,定义示于式(4)^[23]。由于 FAIMS 谱图的峰高对应离子流出分离通道的最大值,代表了 FAIMS 的灵敏度,所以用峰高 H 评估灵敏度,其定义示于式(5)^[24]。

$$R = \frac{CV_p}{W} \quad (4)$$

$$H = n_{\text{in}} Q \exp\left(-t_{\text{drift}} \frac{\pi^2 D}{d_{\text{eff}}^2}\right) \quad (5)$$

式中, CV_p 为最大峰强度处的补偿电压绝对值, W 为半峰宽, n_{in} 为迁移区入口离子浓度, Q 为流量, t_{drift} 为离子迁移时间, D 为扩散系数, d_{eff} 为有效迁移高度。

FAIMS 的有效迁移高度 d_{eff} 、最大峰强度处的补偿电压绝对值 CV_p 、半峰宽 W 的定义式如下^[25-27]:

$$d_{\text{eff}} = d - |\Delta d| = d - \left| K_0 S \int_0^T f(t) \left\{ 1 + \alpha \left[\frac{S f(t)}{N} \right] \right\} dt \right| \quad (6)$$

$$CV_p = \frac{dS}{1 + \frac{1}{\gamma \alpha (E/N)}} \quad (7)$$

$$W = \frac{3.6 Q d}{h l K_0} \left[1 - 6 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^3 \right] \quad (8)$$

式中, d 为分离通道高度, Δd 为损耗高度, S 为射频电场最大幅值, γ 为分离电压脉冲占空比, T 为射频电源周期, $f(t)$ 为射频电场形状函数, N 为气体密度, h 为分离通道宽度, l 为分离通道长度。

射频电压幅值是 FAIMS 的重要工作参数,其影响 FAIMS 的灵敏度与分辨率,示于图 8。由图 8a 可以看出,增大射频电压幅值会减弱 FAIMS 灵敏度,这是由 FAIMS 有效迁移高度减小导致的。由式(5)、(6)可得,随着分离电压幅值的增大,离子在分离通道内的损耗高度 Δd 越大,与分离通道壁距离小于 Δd 的离子会碰撞到通道壁被中和,导致峰强度减弱。从图 8b 可以看出,增大射频电压幅值可以有效提高 FAIMS 分辨率,这是因为提高射频电压幅值增大了损耗高度 Δd ,减小了半峰宽。同时,由式(7)可得,更高的射频电压需要更大的补偿电压使离子通过分离通道。分辨率与半峰宽负相关,与最大峰强度处的补偿电压绝对值正相关,这 2 个因素共同提高了 FAIMS 分辨率。

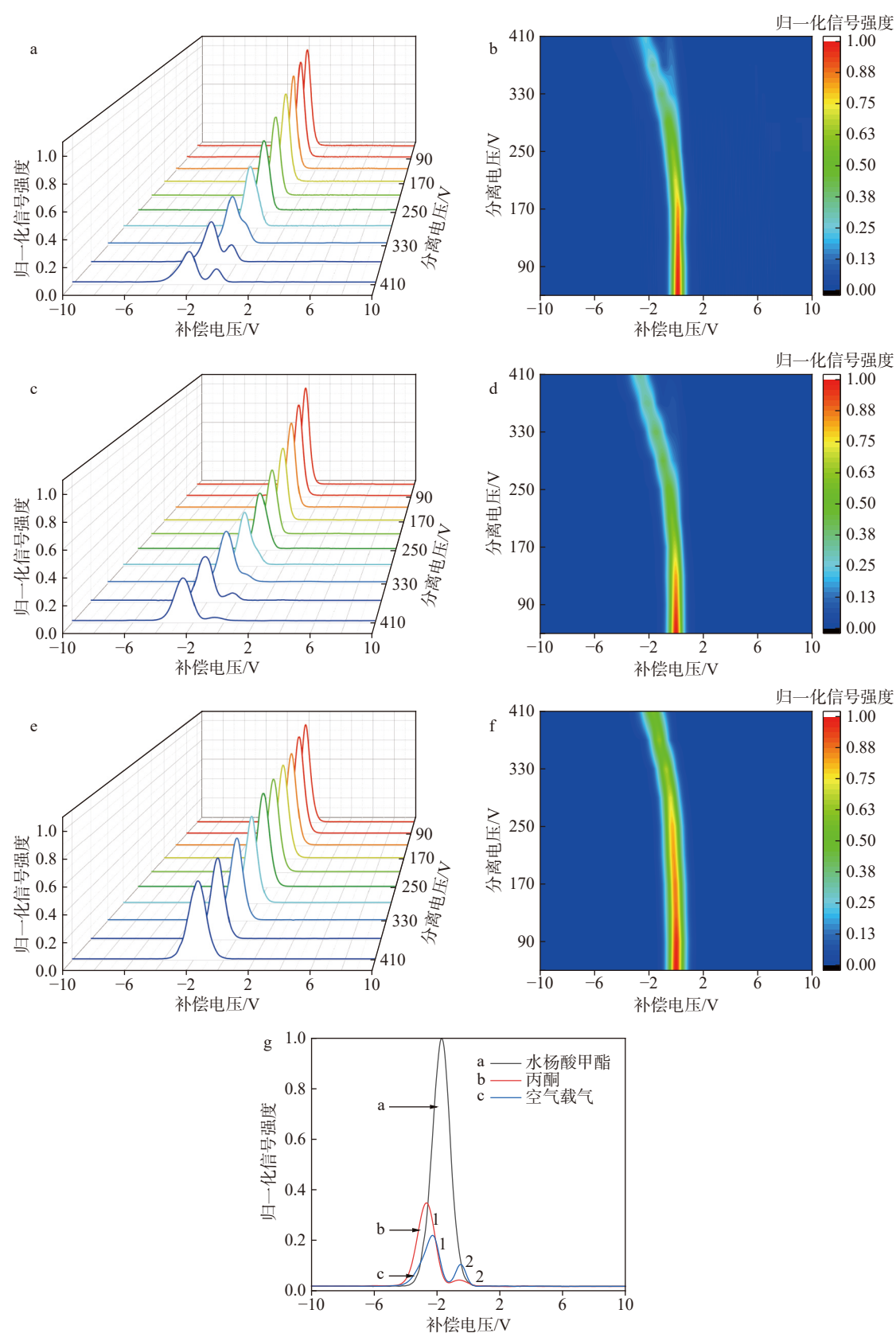
由实验可以看出,提高射频电压幅值可以优化 FAIMS 分辨率,但会损失较大的灵敏度;而降低射频电压幅值虽然能提高灵敏度,但分辨率不佳。因此,分离电压的选择需要综合考虑对二者的影响。

2.4 射频电源频率对 FAIMS 灵敏度和分辨能力的影响

分离电源的射频频率也是 FAIMS 电源的重要参数,会影响 FAIMS 的有效迁移高度,从而改变 FAIMS 的灵敏度与分辨率。本文设计的 FAIMS 分离电源基于半桥逆变电路,具有工作频率调节简易的特点。基于此,本文进一步研究了射频电源工作频率对 FAIMS 灵敏度、分辨率的影响。

分离电压峰-峰值为 330 V、载气流量为 2.5 L/min 的条件下,在分离通道上施加不同频率的射频电压,频率从 200 kHz 递增至 1 MHz,步长为 200 kHz,得到水杨酸甲酯的谱图示于图 9a,其峰高和分辨率变化曲线示于图 9b。由图 9b 可见,在 200 kHz 时,水杨酸甲酯的峰高度接近 0,意味着离子几乎全部与分离通道壁发生碰撞;随着射频电源频率增大,峰高度明显上升,FAIMS 灵敏度变高。由式(6)可得,射频电源频率与 FAIMS 有效迁移高度 d_{eff} 正相关,故更高的射频电源频率可使更多离子通过分离通道,峰高度更高。

随着射频电源频率的提高,FAIMS 分辨率略微下降,这是由于更高的射频频率增加了有效迁移高度,使流出 FAIMS 分离通道的离子流在补偿电压作用下的衰减速度变慢,增大了半峰宽,



注: a. 空气谱图; b. 空气指纹图; c. 丙酮谱图; d. 丙酮指纹图; e. 水杨酸甲酯谱图; f. 水杨酸甲酯指纹图; g. 分离电压 410 V 时各样品谱图

图7 FAIMS 的检测谱图

Fig. 7 Spectra of samples by FAIMS

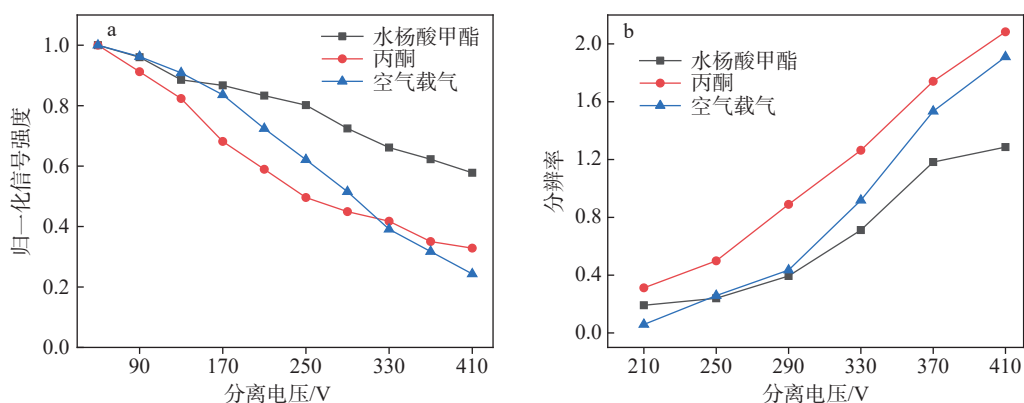


图8 射频电压幅值对峰高度(a)和分辨率(b)的影响

Fig. 8 Effect of RF voltage amplitude on peak height (a) and resolving power (b)

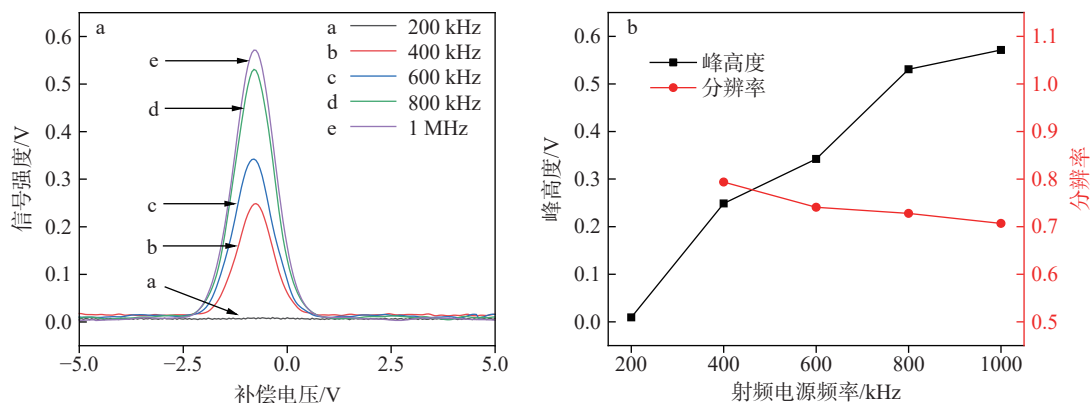


图9 不同射频电源频率下水杨酸甲酯的谱图(a), 射频电源频率对峰高度和分辨率的影响(b)

Fig. 9 Spectrum of methyl salicylate under different RF power supply frequency conditions (a), and effect of RF power supply frequency on peak height and resolving power (b)

而且 $\Delta d \ll d$, 因此, 半峰宽的增大幅度很小。根据式(7)可得, 最大峰强度处的补偿电压 CV_p 只与分离电压有关, 提高射频频率不改变最大峰强度处的补偿电压, 因此分辨率会略微下降。

实验结果表明, 提高射频电源频率能够明显优化 FAIMS 灵敏度, 虽然会降低 FAIMS 分辨率, 但降低幅度很小。

2.5 载气流量对 FAIMS 灵敏度和分辨率的影响

分离电压峰-峰值为 290 V 时, 通入流量范围在 1.5~2.5 L/min 的水杨酸甲酯, FAIMS 谱图示于图 10。可见, 随着载气流量的增大, 峰高度不断增加, 但分辨率降低, 流量的改变不会显著影响离子峰的位置。载气流量的增大会促使离子通过 FAIMS 迁移区的离子迁移时间 t_{drift} 减小, 从式(5)可得, 载气流量与峰高度正相关, 且迁移时间与峰高度负相关, 所以增大载气流量可以提高峰高度。随着载气流量的增大, 离子能够更迅速

地通过分离通道, 这需要使用更高的补偿电压才能将离子推向通道壁进行中和, 从而增加了谱图的半峰宽, 降低了 FAIMS 分辨率。因此, 载气流量的取值需要权衡系统的分辨率和信号检测的灵敏度。

3 结论

本文基于 SJ MOS 开关器件和半桥逆变拓扑, 设计了用于 FAIMS 的高压射频非对称脉冲方波分离电源, 并得到空气载气、丙酮、水杨酸甲酯的谱图。电源波形测试结果表明, 该电源具有 500 V/1 MHz 的高压高频输出, 波形质量接近理想方波, 具有脉冲毛刺小、功耗低的优点。谱图测试结果表明, 使用该电源的 FAIMS 系统具有将待测物质与背景载气进行区别、分辨的能力。分离电压梯度测试结果表明, 随着分离电压幅值的增大, FAIMS 分辨率增大, 灵敏度降低。

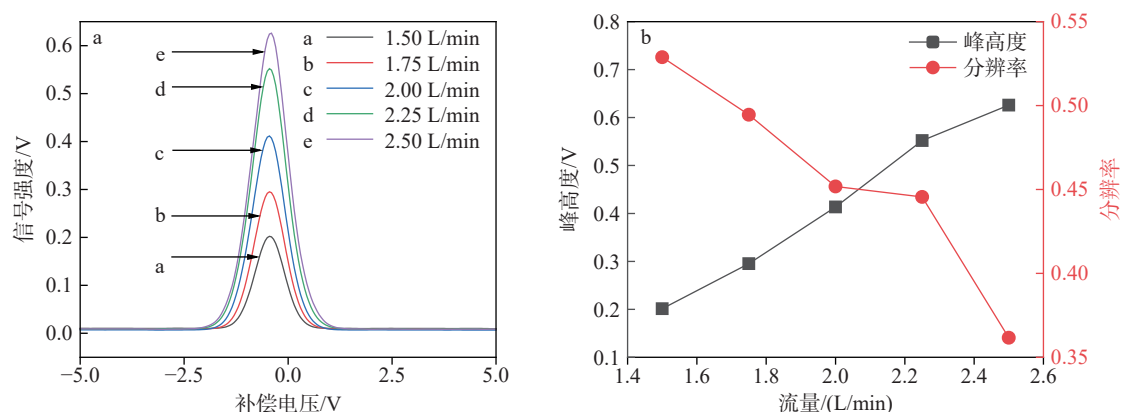


图10 不同流量条件下水杨酸甲酯的谱图(a), 流量对峰高度与分辨率的影响(b)

Fig. 10 Spectrum of methyl salicylate under different flow rate conditions (a), effect of flow rate on peak height and resolving power (b)

频率梯度测试结果验证了提高 FAIMS 射频电源频率可在损失较少分辨率的同时有效提高 FAIMS 灵敏度, 表明该射频电源对优化 FAIMS 灵敏度具有积极作用, 并且 FAIMS 载气流量的选择要兼顾灵敏度与分辨率这 2 个相互制约的参数。本文设计的电源还可进一步优化器件选型和寄生参数, 增大分离电源的极限峰-峰值和工作频率, 对优化 FAIMS 分辨率、兼容多种 FAIMS 迁移区构型具有重要意义。

参考文献:

- [1] EICEMAN G A, KARPAS Z, HILL H H. Ion mobility spectrometry[M]. 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press. 2013: 1-400.
- [2] ARMENTA S, ALCALA M, BLANCO M. A review of recent, unconventional applications of ion mobility spectrometry (IMS)[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2011, 703(2): 114-123.
- [3] EICEMAN G A, STONE J A. Ion mobility spectrometers in national defence[J]. *Analytical Chemistry*, 2004, 76(21): 390A-397A.
- [4] 郝杰, 李俊晖, 王陈璐, 高文清, 石守东, 俞建成, 唐科奇. 基于高场非对称离子迁移谱的糖类异构体分离研究[J]. *质谱学报*, 2022, 43(5): 643-652.
- [5] WANG H, LIU Y, CHEN C. Alpha function of FAIMS: modeling uncertainty and experimental findings[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 368: 132-238.
- [6] MILLER R A, NAZAROV E G, EICEMAN G A, THOMAS KING A. A MEMS radio-frequency ion mobility spectrometer for chemical vapor detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, 91(3): 301-312.
- [7] 陆钊, 孙鹏飞, 马硕, 汪小知, 吴越. 中药材中二氧化硫残留量测定方法比较[J]. *中南药学*, 2015, 13(10): 1 077-1 080.
- [8] LU Fang, SUN Pengfei, MA Shuo, WANG Xiaozhi, WU Yue. Comparison of sulfur dioxide residue in Chinese herbal medicines[J]. *Central South Pharmacy*, 2015, 13(10): 1 077-1 080(in Chinese).
- [9] 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.
- [10] SHVARTSBERG A A, SMITH R D. Optimum waveforms for differential ion mobility spectrometry (FAIMS)[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2008, 19(9): 1 286-1 295.
- [11] 郭江, 唐飞, 杨涛, 王晓浩, 林镇翔. 基于 FAIMS 的高场非对称方波电源系统设计[J]. *西南科技大学学报*, 2010, 25(1): 51-55.
- [12] GUO Jiang, TANG Fei, YANG Tao, WANG Xiaohao, LIN Zhenxiang. Design of high-field asymmetric pulse power supply for FAIMS[J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2010, 25(1): 51-55(in Chinese).
- [13] KRYLOV E V, COY S L, VANDERMEY J, SCHNEIDER B B, COVEY T R, NAZAROV E G. Selection and generation of waveforms for differential mobility spec-

- trometry[J]. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81(2): 024101.
- [12] 刘友江, 王焕钦, 陈然, 孔德义, 陈池来, JUERGEN B. 高场不对称波形离子迁移谱关键测控模块研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(9): 1 974-1 979.
- LIU Youjiang, WANG Huanqin, CHEN Ran, KONG Deyi, CHEN Chilai, BRUGGER J. Study on key measurement and control modules of high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(9): 1 974-1 979(in Chinese).
- [13] 陈天志, 唐飞, 熊继军, 林镇翔. FAIMS 离子检测用高场非对称波电源设计[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(13): 3 470-3 473.
- CHEN Tianzhi, TANG Fei, XIONG Jijun, LIN Zhenxiang. Design for high-field asymmetric waveform power supply with FAIMS[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(13): 3 470-3 473(in Chinese).
- [14] 李茂, 李辉, 钟其水, 何柳. FAIMS 系统用高频高压非对称脉冲电源设计[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(7): 1 508-1 512.
- LI Mao, LI Hui, ZHONG Qishui, HE Liu. Design of high frequency high voltage asymmetric pulse power supply for FAIMS systems[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(7): 1 508-1 512(in Chinese).
- [15] 钟伦超, 石文艳, 周金力, 游占华, 龚涛. FAIMS 电源低功耗小型化及其优化研究[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(7): 144-148.
- ZHONG Lunchao, SHI Wenyan, ZHOU Jinli, YOU Zhanhua, GONG Tao. Research on low power, miniaturization and optimization of FAIMS power supply[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(7): 144-148 (in Chinese).
- [16] CAPUA G D, FEMIA N. Modeling switching losses in MOSFETs half-bridges[J]. *IEEE*, 2012: 93-96.
- [17] 赵敏, 张东来, 李铁才, 王子才. 功率 MOSFET 隔离驱动电路设计分析[J]. *电力电子技术*, 2016, 50(2): 81-83.
- ZHAO Min, ZHANG Donglai, LI Tiecai, WANG Zicai. Design for isolated driver circuit of power MOSFET[J]. *Power Electronics*, 2016, 50(2): 81-83(in Chinese).
- [18] BLINOV A, VINNIKOV D, JALAKAS T. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters[J]. *Electronics and Electrical Engineering*, 2011, 113(7): 9-14.
- [19] XIONG Y, SUN S, JIA H, SHEA P, JOHN SHEN Z. New physical insights on power MOSFET switching losses[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(2): 525-531.
- [20] LI Y, JIA Y, HE Y, ZHAO Y, HUANG A Q, ZHANG L, LEI Y, YU R, MA Q, HUANG Q, SEN S. Evaluation and analysis of temperature-dependent dynamic of GaN power devices considering high-frequency operation[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, 8(1): 111-123.
- [21] KRYLOVA N, KRYLOV E, EICEMAN G A, STONE J A. Effect of moisture on the field dependence of mobility for gas-phase ions of organophosphorus compounds at atmospheric pressure with field asymmetric ion mobility spectrometry[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2003, 107(19): 3 648-3 654.
- [22] HAGEMANN L T, REPP S, MIZAIKOFF B. Hybrid analytical platform based on field-asymmetric ion mobility spectrometry, infrared sensing, and luminescence-based oxygen sensing for exhaled breath analysis[J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2 653.
- [23] LI J, LI L, GAO W, SHI S, YU J, TANG K. Two-dimensional FAIMS-IMS characterization of peptide conformers with resolution exceeding 1000[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(16): 6 363-6 370.
- [24] KRYLOV E V, NAZAROV E G, MILLER R A. Differential mobility spectrometer: model of operation[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2007, 266(1/2/3): 76-85.
- [25] 林丙涛. 高场不对称波形离子迁移谱技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [26] 曾鸿达, 杜晓霞, 牟家浩, 黄介南, 李华. 基于 PCB 钎焊工艺制作小型双 PCB 组合式气体 FAIMS 传感器及其实验研究[J]. *传感技术学报*, 2022, 35(7): 865-872.
- ZENG Hongda, DU Xiaoxia, MOU Jiahao, HUANG Jienan, LI Hua. Fabrication and experimental study of small double PCB combined gas FAIMS sensor based on PCB brazing process[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(7): 865-872(in Chinese).
- [27] 陈池来. 二维高集成高场不对称波形离子迁移谱[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.

(收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2024-12-17)