

用于无损离子操纵结构的双极性射频电源的研制

刘青, 许润泽, 张允晶, 李灵锋, 李鹏

(苏州大学电子信息学院, 江苏苏州 215006)

摘要: 无损离子操纵结构(structures for lossless ion manipulations, SLIM)是一种在特殊背景气体下,利用静电场、射频电场、离子驱动电场共同作用实现对气相离子无损传输的新结构,在物质传输和分离方面有着广阔的应用前景。为了充分发挥 SLIM 在体积和成本上的优势,本研究研制了一款体积小、结构紧凑、成本经济的高频高压双极性射频(radio frequency, RF)电源。该电源使用隔离模块实现控制电路与功率电路的电气隔离,并采用以 GaN 金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)为核心的半桥电路作为输出级。针对 SLIM 的容性负载特性,利用电阻-电感-电容(RLC)电路的滤波特性,实现双极性正弦脉冲电压的输出。经测试,该电源可输出频率 1 MHz、峰-峰值 420 V(± 210 V)的双极性正弦射频高压信号。在实验室自建的基于行波(traveling wave, TW)的无损离子操纵结构(TW-SLIM)迁移谱实验平台上,以甲基膦酸二甲酯(DMMP)为样本,深入探究了射频电源幅值及频率对小分子离子传输效率的影响。结果表明,射频电源幅值及频率均会对 TW-SLIM 结构的离子传输效率产生影响,并存在 1 个最优值范围,这与 COMSOL 的仿真结果相吻合。该射频电源能够有效支持 TW-SLIM 平台的稳定运行,对推动基于 SLIM 的小分子迁移谱技术的小型化和便携化研发具有重要价值。

关键词: 无损离子操纵结构(SLIM); 射频电源; 半桥电路; 隔离电路

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2025)01-0097-09

DOI: 10.7538/zpxb.2024.0047

CSTR: 32365.14.zpxb.2024.0047

Development of a Bipolar Radio-frequency Power Supply for Structures of Lossless Ion Manipulations

LIU Qing, XU Run-ze, ZHANG Yun-jing, LI Ling-feng, LI Peng

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Structures for lossless ion manipulations (SLIM) is a new structure to realize the lossless transmission of gas phase ions by using the combination of electrostatic fields, radio frequency electric fields and ion driving electric fields under special background gas. Its potential applications in material transport and separation are numerous. In order to take full advantages of lossless ion manipulation structures in terms of cost and volume, a low-cost, high-frequency, bipolar radio frequency (RF) power supply with low complexity and compact design was developed in this study. The power supply employed an isolation module to provide electrical isolation between the control and power circuits. In addition, the output stage used a half-bridge circuit with GaN metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) as the core devices. Given the capacitive load characteristics of SLIM, the filter characteristics of a resistor-inductor-capacitor (RLC) circuit were

utilized to output bipolar sinusoidal pulse voltages. Through experimental testing, the power supply was able to provide a 420 V (± 210 V) peak-to-peak sinusoidal RF high-voltage signal at 1 MHz. On a lab-built instrument platform based on traveling wave-based structures for lossless ion manipulations (TW-SLIM), the influence of the RF voltage amplitude and frequency on the transport efficiency of small molecule ions was investigated using dimethyl methylphosphonate (DMMP) as an analyte. The results showed that both the amplitude and frequency of the radio frequency power supply can affect the ion transport efficiency of the TW-SLIM structure, and there is an ideal range. These findings align with the outcomes of COMSOL simulations. This RF power supply can support the TW-SLIM platform in an efficient manner and is highly valuable for developing compact portable research equipment based on SLIM.

Key words: structures for lossless ion manipulations (SLIM); radio frequency power supply; half-bridge circuit; isolated circuit

离子迁移谱 (ion mobility spectrometry, IMS) 技术已成为分析复杂化学成分强大的分离手段^[1]。为增加离子迁移路径以及传输效率, Smith 团队^[2-3]于 2014 年提出了无损离子操纵结构 (structures for lossless ion manipulations, SLIM)。行波 (traveling wave, TW) 驱动的行波无损离子操纵结构 (TW-SLIM)^[4-6]由 2 组平面电极组成, 射频 (radio frequency, RF) 电极与行波电极间隔分布, 通过在电极上施加电压产生静电场、射频电场和驱动电场, 在特定的背景气体压强下, 将离子束缚在一定的区域内以实现离子无损传输。

上述电场中, 射频电场由相邻射频电极上施加的相位差为 180° 的射频电压生成, 射频电压的幅值及频率均会对离子传输效率产生影响。目前, 基于 SLIM 平台的射频源研究较少, 相关实验均使用成熟的工业射频源设备, 大多数体积较大、电路设计复杂、成本高昂。射频源设计的主要难点在于: 1) 如何利用简单的电路设计进行半桥/全桥隔离驱动以实现双极性电压输出; 2) 高频高压会增加开关器件的功耗, 导致严重的发热问题, 需要更高水平的器件性能和散热设计。此外, 在 TW-SLIM 中, 由于其结构特性, 相邻射频电极间存在寄生电容, 相当于双极性电压间存在容性负载, 且负载值随着 SLIM 长度的增长而增加, 而 TW-SLIM 的优势之一是其长度在理论上可以无限增加。对于高频的射频源而言, 容性负载越大, 其带来的功耗越高, 这进一步提高了对射频源的要求^[7]。

针对上述难点, 本文设计了一种可应用于 TW-SLIM 实验平台的射频源。采用隔离芯片实

现半桥电路驱动, 并选用 GaN 材料金属-氧化物-半导体场效应管 (MOSFET) 作为半桥电路的开关器件, 降低了高频高压开关过程中的损耗^[8-9], 通过不同散热部件的相互配合达到更好的散热效果。针对 SLIM 的容性负载特性, 利用电阻-电感-电容 (RLC) 电路的滤波功能^[10-12], 将方波脉冲电压转换为正弦波。经测试, 频率为 1 MHz 时, 该射频源最大可输出 ± 210 V 双极性正弦波脉冲电压。

目前, 大多数 SLIM 的研究集中在与质谱联用, 主要用于大分子物质的无损传输与操纵^[13-16]。本文将研究 TW-SLIM 结构中小分子物质的传输性能, 使用 COMSOL 进行仿真分析, 并使用上述射频源于实验室自制的 TW-SLIM 迁移谱平台上进行实验, 探究射频电压幅值及频率对小分子离子传输性能的影响, 并得出最优值范围。

1 电路部分

1.1 TW-SLIM 结构及工作原理

TW-SLIM 是一种基于行波电场驱动离子运动的装置, 示于图 1a。射频电极与行波电极间隔平行分布, 保证射频与行波隔离, 具有更简单、更高效的离子束缚性。相邻的射频电极上分别施加相差 180° 的射频电压, 生成的电场将离子限制在 2 个平行电极板之间。直流保护电极 (Guard) 上施加直流电压, 用以限制离子在横向上的移动。每 8 个行波组成 1 个行波序列, 在整个离子路径上周期性重复, 示于图 1b。电极上施加周期性的行波电压, 形成行波电场驱动离子沿径向运动。

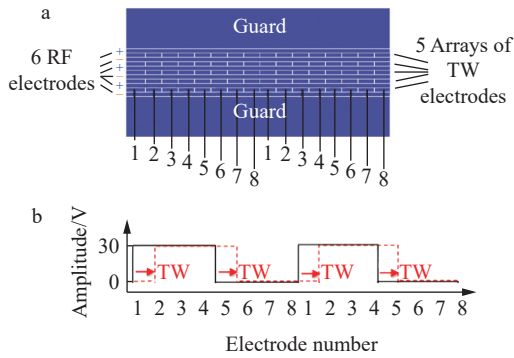


图1 TW-SLIM 电极结构示意图(a), TW 电压配置(b)

Fig. 1 Electrode structure of TW-SLIM (a), configuration of TW voltage (b)

1.2 双极性射频电源设计

双极性射频脉冲电源支持两路反相(相位相差 180°)射频电压输出,由主控电路、隔离电路和半桥电路组成。其中,主控电路输出脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制信号,用以控制半桥电路开关,实现高频高压射频电压输出,输出电压由所供高压电源决定;隔离电路由隔离电源及隔离驱动芯片组成,实现高低压侧的电气隔离;半桥电路由驱动芯片、驱动电路和 MOSFET 电路组成。

1.2.1 隔离模块 本设计通过隔离电路实现完全的电气隔离和高压侧双极性电压输出,支持 1 500 V 直流电压隔离,同时降低高低压侧信号的相互干扰,提高了系统的安全与稳定性。传统隔离驱动电路多使用变压器实现,但在高频变频应用中可能出现变压器饱和、功率不足、驱动信号质量差等问题。此外,特定场景下变压器绕制困难、体积大,不利于电路及结构设计。因此,本文采用集成隔离半桥驱动芯片,实现低压侧主控电路控制信号与高压侧驱动信号的隔离;同时,使用隔离电源为高压侧驱动信号提供电源。VDDL、GNDL 分别表示低压侧电源及参考地;VH+、VH- 分别为输入双极性直流源的正负极, GNDH 为其参考地;驱动芯片及隔离电源模块均以 VH- 为参考地, VDDH 为电源模块产生的为驱动芯片高压侧供电的电源,示于图 2a。半桥电路上下桥臂分别连接 VH+、VH-, 最终实现以 GNDH 为参考地,幅值为 VH+/VH- 的双极性脉冲电压输出,示于图 2b。

1.2.2 半桥模块 半桥电路由驱动电路和 2 个 MOSFET 电路组成。MOSFET 选用 Thransphorm 公司的 GaN FET; TP65H150G4PS。GaN FET 的开

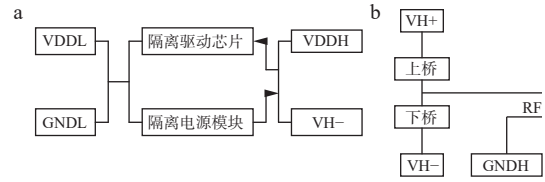


图2 隔离电路(a)和半桥电路(b)示意图

Fig. 2 Diagrams of isolation circuit (a) and half bridge circuit (b)

关速率比同类传统半导体材料的产品更快、效率更高、工作电压范围更宽,能最小化设备尺寸。TP65H150G4PS 栅极驱动电压为 10~20 V,需专门的驱动芯片。半桥驱动芯片选用 SKYWOKS 公司生产的 SI824BB,只需一路 PWM 控制信号输入,即可输出上下桥臂 MOSFET 驱动信号。半桥电路示于图 3a。

SI824BB 芯片内部实现输入/输出隔离,最大支持 $5 \text{ kV}_{\text{RMS}}$ 电压隔离。输出端集成两路推挽电路用于驱动 MOSFET,最大支持 24 V 驱动电压和 4 A 驱动电流输出。通过自举电路产生悬浮电压,其中自举电容 C_{boot} 为驱动芯片内部高压侧开关提供悬浮电压和 MOSFET 栅极开启所需的电荷,从而使上桥臂导通。经计算,电容取 18 nF, 50 V。

由于开关延时的存在,半桥电路中的 1 个管子栅极信号变低时,并不会立刻关断。因此,为防止上下管同时导通造成电流穿通,1 个管子必须在另 1 个管子关断一定时间后才能开启,这段时间称为死区时间(t_d)。SI824BB 芯片可通过调整死区编程电阻 R_d (k Ω) 的大小控制死区时间,计算公式如下:

$$t_d(\text{ns}) = 10 \cdot R_d(\text{k}\Omega) \quad (1)$$

本设计中,开关频率最大为 1.5 MHz,据此 R_d 取 1 k Ω ,则死区时间设定为 10 ns。

MOSFET 驱动电路等效模型示于图 3b。 Q 为 MOSFET 标识;栅漏电容(C_{gd})、栅源电容(C_{gs})、漏源电容(C_{ds})为 MOSFET 制造工艺中形成的寄生电容,其中 C_{gd} 、 C_{gs} 组成 MOSFET 栅极的输入电容 C_{iss} ; R_g 为栅极驱动电阻。MOSFET 开启时,驱动芯片经 R_g 向输入电容 C_{iss} 充电,直至电荷量达到栅极电荷(Q_g)时, MOSFET 完全导通。驱动引脚输出低电平时,电容经 R_g 放电,实现 MOSFET 关断。 Q_g 的大小直接影响 MOSFET 的开关速度和功耗。GaN 材料的 MOSFET 有着低 Q_g 、低导通电阻等优点,在高频应用中能够实现

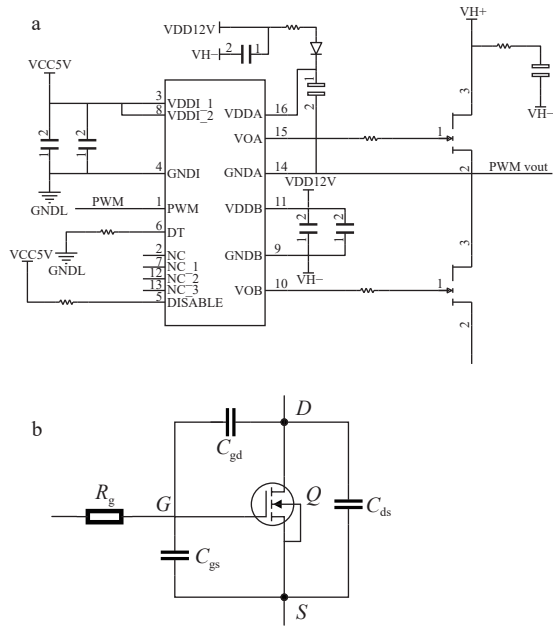


图3 半桥电路(a), MOSFET 电路模型(b)
Fig. 3 Half bridge circuit (a), circuit model of MOSFET (b)

更快的开关速度和更小的驱动损耗。

驱动电阻 R_g 可限制栅极充电电流峰值, 防止 MOSFET 被过度激励而损坏。通常情况下, 驱动走线存在杂散寄生电感 (L_p), 包括驱动芯片引脚、印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 走线和 MOSFET 引脚的感抗, 可能导致在电压突变时与栅极电容形成电感-电容 (LC) 振荡。为减小振荡效应, R_g 需满足:

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

由于 L_p 的数值难以精确测量, 使用 Ansys Q3D 软件提取 PCB 驱动走线的寄生电感, 近似取值 10 nH, C_{iss} 为 598 pF, 则 R_g 应大于 8.17 Ω 。考虑到 R_g 值过大会增加驱动电压上升与下降的时间, 进而增加开关损耗, 因此本设计中 R_g 取 9.1 Ω 。

1.2.3 SLIM 结构的电路模型 在 SLIM 结构模型中, 由于相邻 RF 电极间距相近, 彼此间存在寄生电容, 且该寄生电容值会随着 SLIM 长度的增加而增加。当在 RF 电极上施加相位相差 180° 的射频电压时, 该电容成为 RF 源正负极输出间的负载。对于高频、高压射频源, 容性负载将带来大量的功率损耗, 电容越大, 功耗和发热越严重。针对 SLIM 这一特性, 本设计提出了以下改进。

利用 SLIM 容性负载特性, 采用 RLC 串联滤

波电路将半桥电路输出的方波转换为正弦波, 从而实现电压幅值增益, 有效降低了相同峰-峰值下的功率损耗。电路模型示于图 4 (以下所述电压均以系统地地为参考地)。

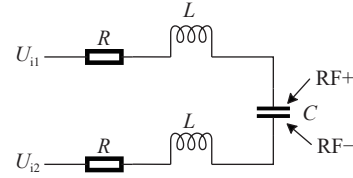


图4 SLIM 电路模型
Fig. 4 Circuit model of SLIM

图中, R 为电阻, 是用于限流和构成 RLC 振荡电路的参数之一; 电容 C 为 SLIM 射频电极间的等效负载; L 为电感, 与电容 C 配合用于选频; U_{i1} 、 U_{i2} 为上述半桥电路输出的反相脉冲方波, 即:

$$U_{i1} = -U_{i2} \quad (3)$$

根据电路模型, 以 RF+ 电极上电压 U_+ 为例, 计算到达 SLIM 射频电极两端的电压。 U_{i1} 、 U_{i2} 分别单独作用时:

$$\begin{cases} U_{+1} = \frac{R + j2\pi fL - j\frac{1}{2\pi fC}}{2R + 2 \cdot j2\pi fL - j\frac{1}{2\pi fC}} \cdot U_{i1} \\ U_{+2} = \frac{R + j2\pi fL}{2R + 2 \cdot j2\pi fL - j\frac{1}{2\pi fC}} \cdot U_{i2} \end{cases} \quad (4)$$

$$U_+ = U_{+1} + U_{+2} \quad (5)$$

U_{i1} 、 U_{i2} 为方波, 经傅里叶级数展开如下:

$$U_{i1} = -U_{i2} \sim \frac{4 \cdot U_{\max}}{\pi} \sum \frac{\sin(2n-1) \cdot 2\pi ft}{2n-1} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

式中, f 为方波频率, U_{\max} 为方波幅值。方波经 RLC 滤波电路后, 高次谐波均被滤除, 仅基波到达射频电极两端, 即式 (6) 仅剩 $n=1$ 时的量, 方波转化为正弦波。当 U_{i1} 、 U_{i2} 共同作用时, 综合式 (3)~(6) 得:

$$\begin{aligned} U_+ &= U_{+1} + U_{+2} \\ &= \frac{-j\frac{1}{2\pi fC}}{2R + 2 \cdot j2\pi fL - j\frac{1}{2\pi fC}} \cdot \frac{4U_{\max}}{\pi} \sin 2\pi ft \end{aligned} \quad (7)$$

式中, 电容 C 为 pF 级, 电感 L 为 μ H 级, f 取 0.7~1.5 MHz, R 取 5 Ω 。实部与虚部相比, 其值对正弦波的相位与幅值影响均可忽略不计, 则:

$$U_+ = \frac{-4U_{\max}}{8\pi^3 f^2 LC - \pi} \sin 2\pi ft \quad (8)$$

RF-电极上电压 U_- 与 U_+ 反相,即:

$$U_- = \frac{4U_{\max}}{8\pi^3 f^2 LC - \pi} \sin 2\pi ft \quad (9)$$

此外,由于系统的连接线路之间也存在寄生电感、电容,调谐电感 L 取值需要根据实际测试效果进行调整。

1.2.4 散热设计 MOSFET工作过程中存在功率损耗,本设计以开关损耗为主,即在开关管断开与关闭瞬间产生的损耗。功率损耗会导致

MOSFET发热,若散热不充分将导致MOSFET过热损坏,因此其散热设计非常重要。相较于常用的铝散热片,本设计选用了散热效果更好的铜材料,并搭配大功率风扇进行散热,示于图5。同时,采用导热系数更高的氧化铝材料作为绝缘垫片,在确保MOSFET绝缘的同时不影响散热效果。另外,在MOSFET上方使用压片以确保其与绝缘垫片、散热片紧密贴合,有效散热。通过电路与散热结构设计的相互配合,该电源系统能够实现体积小(长度90 mm、宽度120 mm、高度70 mm)。

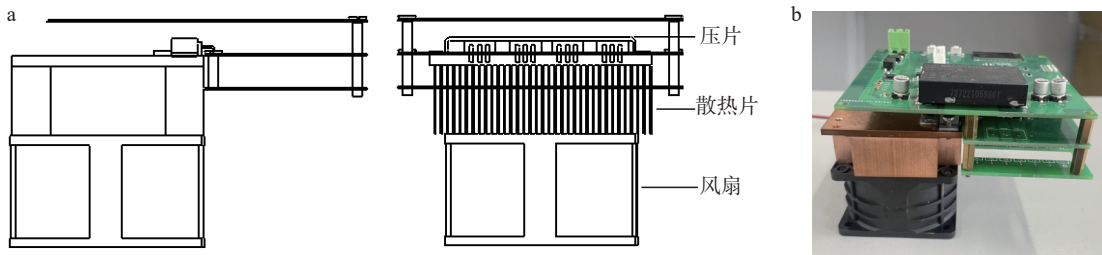


图5 电源系统结构图(a)和实物图(b)

Fig. 5 Structural (a) and physical (b) diagrams of the power supply system

2 实验部分

2.1 实验装置

2.1.1 仿真实验平台 本文采用COMSOL Multiphysics^[17]软件对TW-SLIM中的电场分布及带电粒子运动轨迹进行仿真。COMSOL是一个多物理场仿真软件,其利用有限元法^[18-19],通过求解偏微分方程(组)实现真实物理现象的仿真。相比于其他的粒子轨迹仿真软件(如Axxim、SIMION、ISIS),COMSOL的操作界面更加简洁,对简单结构的计算精度较高^[20]。因此,本文选

择COMSOL进行仿真。

2.1.2 实物实验平台 实验装置主要包括电晕针电离源、毛细管、连续进样装置、离子漏斗、TW-SLIM漂移管和法拉第盘。本系统采用的连续进样系统通过对待测样品加热蒸发后,并利用气泵抽出。进样产生装置主要包括样品气体的产生装置和电晕针电离源(实验室自制)2部分,其中,样品气体的产生装置包括气体存储腔体、气泵、分子筛和存储样品的铝管,示于图6。通过加热装有样品的铝管使样品挥发,在气泵的带

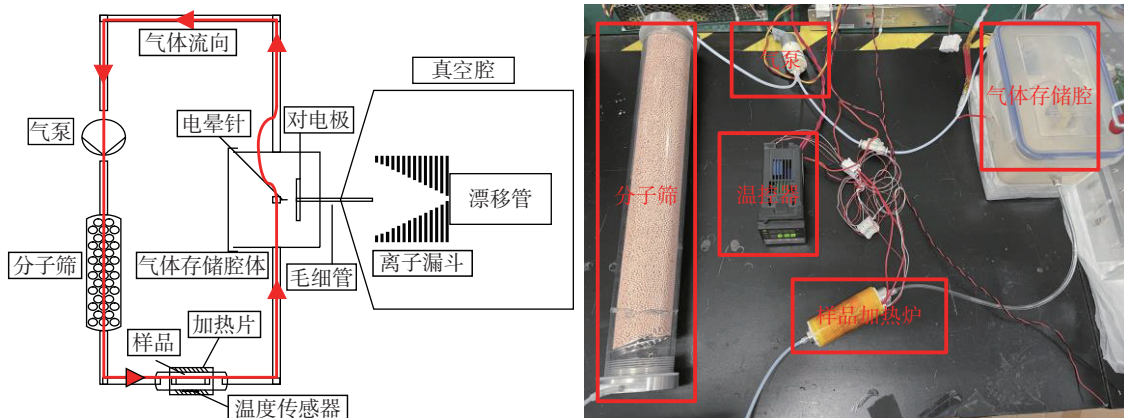


图6 带电样品产生装置

Fig. 6 Generation device of charged sample

动下,随着气流进入气体存储腔体;样品被电离后会通过不锈钢毛细管进入真空腔体;离子离开加热毛细管后,在自制的离子漏斗处聚焦,再进入漂移管区。

离子漂移管采用印刷电路板制成,离子路径为长 8 cm 的直线型。漂移管射频信号由前述射频源提供,行波信号由实验室自制的行波脉冲电源提供。离子流信号通过自制的法拉第盘接收,对微弱电流信号进行放大,然后使用普源示波器(MSO5204)采集波形数据。

2.2 试剂

为了便于测试,样品选择实验室自制的易挥发甲基膦酸二甲酯溶液(DMMP),分子式为 $C_3H_9O_3P$,相对分子质量为 124 u。

2.3 实验条件

电晕针电压 3 100 V,毛细管电压 75 V,毛细管内径 0.3 mm,长度 10 mm;样品加热炉温度 60 °C,进样系统流速 1 363.6 mL/min;离子漏斗射频电压峰-峰值 140 V,频率 1 MHz;行波电压峰-峰值 25 V,频率 50 kHz;Guard 电极电压 7 V;法拉第盘隔离栅网电压 5 V;工作气压 240 Pa。

3 结果与讨论

3.1 电源测试

SLIM 射频电极两端的正弦波电压信号通过示波器和具有 10 倍衰减的探头(普源 RP1010H)测量。实验室自制的 8 cm 直线型 SLIM 实物示于图 7a,由 6 组 RF 电极和 5 组 TW 电极组成,等效电容值 26 pF。当信号频率为 1 MHz 时,电压

增益为 2,支持峰-峰值 0~420 V 电压范围的正弦波输出,且不同幅值下的波形均能保持较好的一致性。核心开关器件 MOSFET 最高工作温度不超过 70 °C,能够支持电源系统长时间稳定输出,满足 SLIM 结构对射频电压的质量要求。射频源支持 0.7~1.5 MHz 频率范围的信号输出,降低信号频率,能够达到的电压峰-峰值上限将会升高,反之,则降低。

理论上,负载电路在谐振点的工作增益最大且无高次谐波分量影响,输出波形最理想。但由于实际电路接线复杂,存在寄生电感、电容,同时元器件在高频信号下存在寄生参数,如等效电感(equivalent series inductance, ESL)等,谐振点难以精确计算测量。射频源实测结果表明,信号频率在 0.7~1.5 MHz 范围时,RLC 电路均能够较好地滤除高次谐波分量,在 SLIM 的射频电极上输出较为理想的正弦波信号,示于图 7b。当信号频率为偏移谐振点较远的低频点时,由于其高次谐波也处于 RLC 电路的通带范围内,SLIM 射频电极两端电压信号中会出现明显的高次谐波分量。

为了更好地验证该电源方案的实用性,设计了不同迁移路径和长度的 SLIM 漂移管,根据不同的等效电容值匹配调谐电感,并结合实测调整,各部件参数列于表 1。实验结果表明,当 SLIM 等效电容增加时,通过调整调谐电感值可实现理想的正弦波电压输出。可以推断,当 SLIM 长度增加到常规的米级以上,该电源方案仍可满足实际的应用需求。

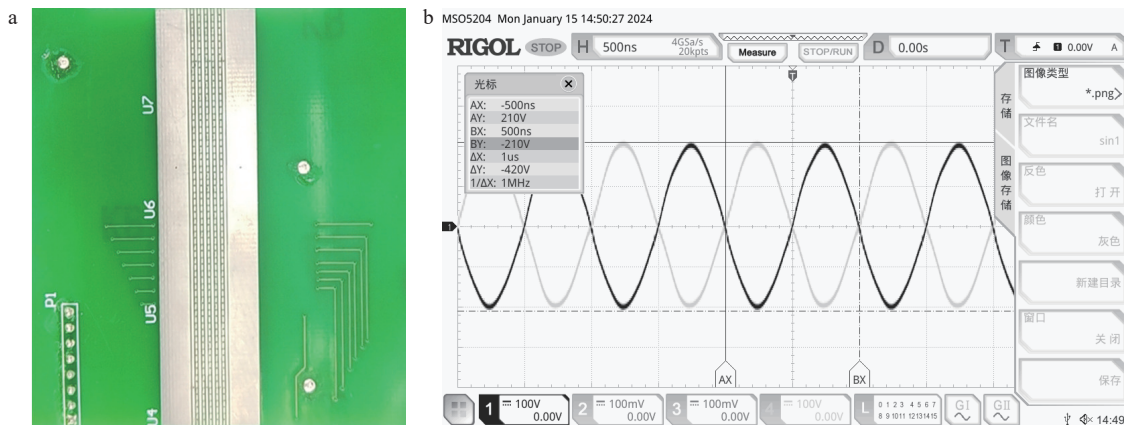


图 7 8 cm 直线型 SLIM(a), 正弦波脉冲电压(b)

Fig. 7 Linear SLIM of 8 cm (a), RF voltage of sine wave (b)

表1 SLIM 漂移管参数

Table 1 Parameters of SLIM drift tube

| 迁移路径 Migration path | 迁移长度 Migration length/cm | 等效电容值 Equivalent capacitance/pF | 调谐电感值 Tuning inductance/ μ H |
|------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 直线型 | 8 | 26 | 47 |
| 直线型 | 20 | 50 | 32 |
| 一次转弯 | 17 | 78 | 22 |
| 多次转弯 | 95 | 510 | 12 |

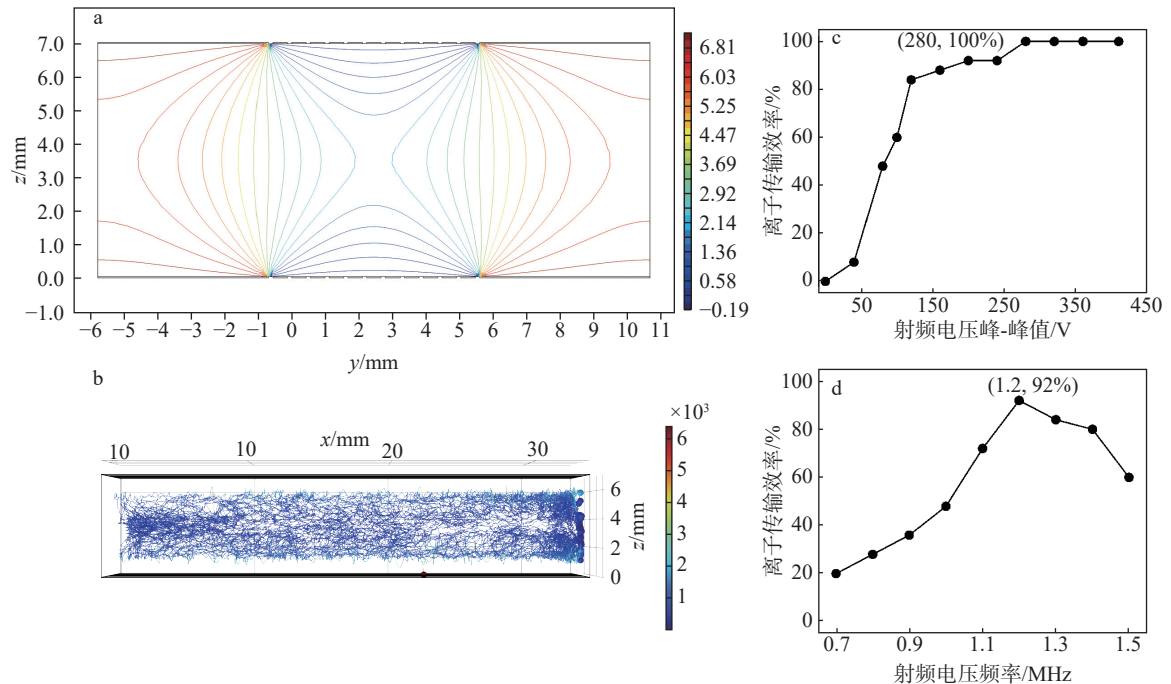
注：电容值是测试频率为1 MHz时SLIM上下极板总等效电容值

3.2 射频电压幅值和频率对离子传输效率的影响

3.2.1 仿真结果 利用 COMSOL 对 TW-SLIM 的电场分布和带电粒子的运动轨迹进行仿真，离子迁移路径长度为 3.5 cm，结果示于图 8。可见，yz 平面上直流保护电压和射频电压等值线分布，中心位置的区域电压最低，表明在中心位置形成了离子阱，正离子被束缚在中心，从而实现无损传输，示于图 8a；射频电压频率为 1 MHz，峰-峰值为 280 V 时，xz 平面的离子运动轨迹示于图 8b，离子在运动过程中没有打到上下极板，几乎全部到达 TW-SLIM 末端，理论传输效率达 100%；离子传输效率随射频电压峰-峰值增大而增大，随频率的增大先增大后减小，仿真结果分别示于

图 8c、8d。

3.2.2 实验结果 实验中，法拉第盘所接微流放大器放大倍数为 10^9 倍，测量离子漏斗后，即 SLIM 漂移管前的总离子流为 250 pA，传输效率为 SLIM 漂移管后的离子流与总离子流的比值。在 240 Pa 压强下，射频电压频率 1 MHz 时，TW-SLIM 传输效率随射频电压峰-峰值的变化情况示于图 9a。当电压峰-峰值超过 320 V 时，测得 TW-SLIM 后的离子流为 249 pA，传输效率基本保持稳定，接近 100%。在研究射频电压频率对离子传输效率的影响时，固定射频峰-峰值为 280 V，改变电压频率，TW-SLIM 传输效率随射频电压频率的增大呈现先增大后减小的趋势，示于图 9b。当射频电压频率为 1.2 MHz 时，TW-SLIM 后的离子流为 248 pA，传输效率达到最高，接近 100%，即对于 TW-SLIM，1.2 MHz 射频电压频率对离子的束缚效果最佳。与仿真结果相比，可以发现离子传输效率受射频电压频率及峰-峰值的影响趋势一致，但具体数值存在差异，其主要原因是仿真实验的离子传输路径较短(3.5 cm)，环境条件理想，而实际实验中的离子传输路径更长(8 cm)且存在电磁干扰、气压波动等干扰因素。



注：a. yz 平面电压分布图；b. xz 平面正离子运动轨迹；c. 不同射频电压峰-峰值的离子传输效率；d. 不同射频电压频率的离子传输效率

图8 仿真实验结果

Fig. 8 Results of simulation experiment

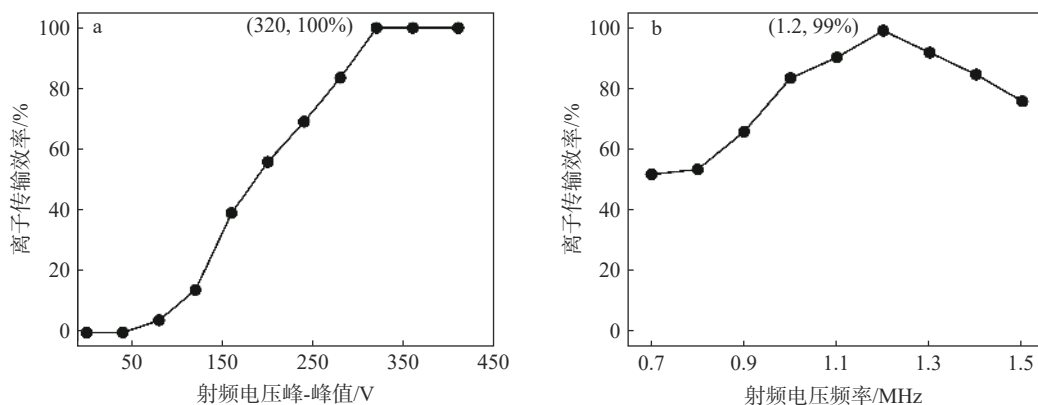


图9 射频电压峰-峰值(a)和射频电压频率(b)对TW-SLIM传输效率的影响
Fig. 9 Impact of RF voltage peak-to-peak value (a) and RF voltage frequency (b) on the transmission efficiency of TW-SLIM

4 结论

本文针对SLIM迁移管的电容负载特性,设计了一种小型双极性脉冲电源,信号频率为1 MHz时,最大支持峰-峰值420 V(± 210 V)的双极性正弦波输出,将其应用于TW-SLIM实验平台,测试射频电源幅值及频率对小分子物质传输效率的影响。结果表明,射频电压频率为1.2 MHz时,离子束缚效果最佳;频率为1 MHz时,峰-峰值为320 V,可基本实现TW-SLIM无损传输,该实验结果为TW-SLIM结构中的小分子离子传输机制提供了重要参考。该射频电源为研发更长离子迁移路径的SLIM提供了必要的电源支持,对后续相关仪器的开发工作具有重要意义。同时,该电源方案可选用性能参数更优的MOSFET进行升级,实现了更高频率和电压的脉冲输出,有较强的实用价值。

参考文献:

- [1] IBRAHIM Y M, HAMID A M, DENG L, GARIMELLA S V B, WEBB I K, BAKER E S, SMITH R D. New frontiers for mass spectrometry based upon structures for lossless ion manipulations[J]. *The Analyst*, 2017, 142(7): 1 010-1 021.
- [2] GARIMELLA S V B, IBRAHIM Y M, WEBB I K, TOLMACHEV A V, ZHANG X, PROST S A, ANDERSON G A, SMITH R D. Simulation of electric potentials and ion motion in planar electrode structures for lossless ion manipulations (SLIM)[J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2014, 25(11): 1 890-1 896.
- [3] TOLMACHEV A V, WEBB I K, IBRAHIM Y M, GARIMELLA S V B, ZHANG X, ANDERSON G A, SMITH R D. Characterization of ion dynamics in structures for lossless ion manipulations[J]. *Analytical Chemistry*, 2014, 86(18): 9 162-9 168.
- [4] HAMID A M, IBRAHIM Y M, GARIMELLA S V B, WEBB I K, DENG L, CHEN T C, ANDERSON G A, PROST S A, NORHEIM R V, TOLMACHEV A V, SMITH R D. Characterization of traveling wave ion mobility separations in structures for lossless ion manipulations[J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(22): 11 301-11 308.
- [5] DENG L, IBRAHIM Y M, BAKER E S, ALY N A, HAMID A M, ZHANG X, ZHENG X, GARIMELLA S V B, WEBB I K, PROST S A, SANDOVAL J A, NORHEIM R V, ANDERSON G A, TOLMACHEV A V, SMITH R D. Ion mobility separations of isomers based upon long path length structures for lossless ion manipulations combined with mass spectrometry[J]. *ChemistrySelect*, 2016, 1(10): 2 396-2 399.
- [6] DENG L, IBRAHIM Y M, HAMID A M, GARIMELLA S V B, WEBB I K, ZHENG X, PROST S A, SANDOVAL J A, NORHEIM R V, ANDERSON G A, TOLMACHEV A V, BAKER E S, SMITH R D. Ultra-high resolution ion mobility separations utilizing traveling waves in a 13 m serpentine path length structures for lossless ion manipulations module[J]. *Analytical Chemistry*, 2016, 88(18): 8 957-8 964.
- [7] 宋兴鑫, 宋增凤, 王秀鑫. 浅谈MOS管的开关速度与功耗、EMI的关系[J]. *内燃机与配件*, 2023(2): 103-105. SONG Xingxin, SONG Zengfeng, WANG Xiuxin. Discussion on the relationship between switching speed,

- power consumption and EMI of MOSFET[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2023(2): 103-105(in Chinese).
- [8] 方冬. 低功耗功率 MOS 器件模型与新结构研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [9] 谭平平, 桂成东, 姜力铭, 陈文光. 基于 GaN 器件的固态射频电源应用研究[J]. *电源学报*, 2020, 18(4): 116-122. TAN Pingping, GUI Chengdong, JIANG Liming, CHEN Wenguang. Research on applications of solid-state RF power supply based on GaN devices[J]. *Journal of Power Supply*, 2020, 18(4): 116-122(in Chinese).
- [10] 邱关源. 现代电路理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [11] 康华光, 张林. 电子技术基础-数字部分[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [12] 吕嘉玮, 牟欢, 刘亚宁, 桑鹏, 李保权. 一种轻小型四极杆质谱仪射频电源的研制[J]. *质谱学报*, 2020, 41(6): 547-555. LYU Jiawei, MOU Huan, LIU Yaning, SANG Peng, LI Baoquan. Development of a miniaturized ratio frequency power for quadrupole mass spectrometer[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2020, 41(6): 547-555 (in Chinese).
- [13] 吴芳玲, 张谛, 徐福兴, 方向, 丁传凡. 离子淌度迁移谱用于分析小分子异构体的新进展[J]. *质谱学报*, 2022, 43(5): 552-563. WU Fangling, ZHANG Di, XU Fuxing, FANG Xiang, DING Chuanfan. New development in ion mobility spectrometry for analysis of small molecule isomers[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2022, 43(5): 552-563(in Chinese).
- [14] WOJCIK R, WEBB I K, DENG L, GARIMELLA S V B, 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]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(1): 183.
- [15] ZHENG X, DENG L, BAKER E S, IBRAHIM Y M, PETYUK V A, SMITH R D. Distinguishing *D*- and *L*-aspartic and isoaspartic acids in amyloid β peptides with ultrahigh resolution ion mobility spectrometry[J]. *Chemical Communications*, 2017, 53(56): 7 913-7 916.
- [16] CHOUINARD C D, NAGY G, WEBB I K, GARIMELLA S V B, BAKER E S, IBRAHIM Y M, SMITH R D. Rapid ion mobility separations of bile acid isomers using cyclodextrin adducts and structures for lossless ion manipulations[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(18): 11 086-11 091.
- [17] 石海峡, 余健文, 刘友江, 陈池来. 平板差分迁移率谱流场及结构参数仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(5): 412-416. SHI Haixia, YU Jianwen, LIU Youjiang, CHEN Chilai. Simulation of the flow field and structural parameters of planar DMA[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(5): 412-416(in Chinese).
- [18] 陈锡栋, 杨婕, 赵晓栋, 范细秋. 有限元法的发展现状及应用[J]. *中国制造业信息化*, 2010, 39(11): 6-8, 12. CHEN Xidong, YANG Jie, ZHAO Xiaodong, FAN Xiqu. The status and development of finite element method[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2010, 39(11): 6-8, 12(in Chinese).
- [19] 张永刚. 有限元法发展及其应用[J]. *科技情报开发与经济*, 2007, 17(11): 178-179. ZHANG Yonggang. The development and application of the finite element method (FEM)[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2007, 17(11): 178-179(in Chinese).
- [20] 王伟民, 徐锐峰, 江游, 张谛, 徐福兴, 丁传凡. 离子阱中 3 种软件程序的离子运动轨迹数值模拟对比[J]. *质谱学报*, 2022, 43(4): 495-503. WANG Weimin, XU Ruifeng, JIANG You, ZHANG Di, XU Fuxing, DING Chuanfan. Comparison of numerical simulation of ion trajectories in three simulation programs of ion trap[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2022, 43(4): 495-503(in Chinese).

(收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-05-07)