

文章编号 1004-924X(2017)06-1567-10

敞开式离子源和微型气泵集成的微型针-柱放电 结构芯片设计与实验分析

李 华^{1,2}, 郭超群¹, 蒋林秀¹, 蒋永荣¹, 朱健铭¹, 肖文香¹, 韦宛伶¹, 陈真诚^{1*}

(1. 桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 广西 桂林, 541004;

2. 广西信息科学实验中心, 广西 桂林, 541004)

摘要:采用 LIGA(Lithographie, Galvanoformung, Abformung)工艺设计加工了一种微型针-柱放电结构芯片,可实现敞开式离子源和微型气泵的系统集成。此微型放电结构由采用电镀铜加工而成的针电极、上圆柱电极和下圆柱电极组成,针-柱间距有 1 mm、2 mm 两种规格。在室温、大气压环境、无外界通入气流的条件下,通过在针-柱电极上加负载直流高压,可产生稳定的气体放电。利用风速计 testo 405-V1 测量芯片气体放电产生的离子风风速,结果表明针-柱间距为 2 mm 时产生的离子风流速最大,可达 0.79m/s。对针-柱间距 2mm 规格的微型芯片进行乙酸进样电离实验,当针-柱之间产生稳定的电晕放电后,可发现位于芯片出口处已被去离子水润湿的 PH 试纸变红。此时利用微弱电流检测系统采集电离产生的离子,当放电电压为-3300V 时,通过微弱电流采集系统检测到的电流信号可达 120pA。采用 LTQ XL 离子阱质谱仪,对芯片电离丙酮、无水乙醇和乙酸乙酯的离子产物进行检测,所得到的主要物质为质子化单体离子和二聚物离子。放电产生离子风风速以及乙酸的进样和电离实验表明,基于 LIGA 的微型针-柱结构芯片可实现大气压环境下敞开式离子源和微型气泵的双重功能。

关键词:微型放电结构;电晕放电;离子源;微型气泵

中图分类号:TH83 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172506.1567

Design and experiment analysis for micro needle-cylinder discharge chip integrated by open-type ion source and micro pump

LI Hua^{1,2}, GUO Chao-qun¹, JIANG Lin-xiu¹, JIANG Yong-rong¹,
ZHU Jian-ming¹, XIAO Wen-xiang¹, WEI Wan-ling¹, CHEN Zhen-cheng^{1*}

(1. School of Life and Environmental Sciences, GuiLin University of
Electronic Technology, GuiLin 541004, China;

2. Information Science Experiment Center of GuangXi, GuiLin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: chenzhcheng@163.com

Abstract: The LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) technology was adopted to design

收稿日期:2016-10-24;修订日期:2017-01-16.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(No. 61204120);广西自然科学基金面上项目(No. 2015GXNSFAA139304);广西自然科学基金青年基金项目(No. 2013GXNSFBA019273);国家级大学生创新项目(No. XY290406);广西高等教育教学改革工程项目(No. 2014GJB144);广西自动检测技术与仪器重点实验室基金项目(No. YQ15114);广西信息科学实验中心资助项目(No. YB1420);桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(No. 2017YJCX86);广西物联网技术及产业化推进协同创新中心资助项目(No. WLW20060503, No. WLW20060504)

and process a micro needle-cylinder discharge structure chip, by doing this, system integration of open-type ion source and micro air pump was realized. The micro discharge structure was composed of pin electrode, upper cylinder electrode and bottom cylinder electrode which were fabricated by copper electroplating. There were two types of needle-cylinder clearances, separately were 1 mm and 2 mm. Under the condition of room temperature, atmospheric pressure environment and no airflow from outside, by loading negative direct current and high voltage on the needle-cylinder electrode, stable gas discharge could be generated. The wind speed of ionic wind caused by chip gas discharge could be measured through testo 405-V1 anemometer. The result shows that if the needle-cylinder clearance is 2 mm, the maximum flow velocity of the ionic wind will reach 0.79 m/s. Acetic acid sample injection ionization experiment of microchip with the needle-cylinder clearance of 2 mm was conducted. We found that when there was stable corona discharge between needle and cylinder, PH test paper located at the chip exit and has been moistened by de-ionized water would be red. At this time, the weak current detection system was used to collect ions generated by ionization, if the discharge voltage was $-3\ 300\text{ V}$, the current signal detected by weak current collection system reached 120 pA. LTQ XL ion trap mass spectrometer was applied to detect products of ions for chip ionization acetone, absolute ethyl alcohol and ethyl acetate, the main obtained substances were protonation monomer ion and biopolymer ion. Speed of ionic wind generated by discharge and sample injection and ionization of acetic acid experiments show that dual functions of open-type ion source and micro air pump can be realized under atmospheric pressure environment based on LIGA micro needle-cylinder structure chip.

Key words: Micro discharge structure; corona discharge; ion source; mini air pump

1 引 言

近年来,分析仪器领域提出了对样品进行现场快速检测的要求,促使人们展开样品无需复杂前处理且在敞开环境下进行离子化方法的研究。另一方面,随着微机电系统技术(Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS)在化学分析仪器领域的应用,质谱仪、离子迁移谱、高场非对称波形离子迁移谱等分析仪器正向着微型化、便携式、低功耗方向发展,而离子源的微型化则是其中的关键。

作为分析仪器的离子源,采用不对称电极结构通过电晕放电产生离子风流速以及实现电离物质是近年来国内外研究者共同关注的热点问题。Martin Sabo, A. Kudryavtsev 等采用针-板装置在大气压条件下实现电晕放电并作为离子源用于离子迁移谱中^[1,2];刘欣等采用针-环不对称结构作为脉冲电晕放电离子源^[3];栗大超等采用针-网不对称电极结构实现脉冲电晕放电并作为离子源用于离子迁移谱^[4];刘坤等采用线-筒电极结构作

为应用于高场非对称波形离子迁移谱的离子源^[5-7];唐飞等采用介质阻挡放电离子源^[8]。这些不对称电极结构都能够作为电晕放电离子源实现物质电离功能,但是放电结构的尺寸都比较大,且需要外接庞大的载气系统。在前期的研究中,本课题组采用针-柱放电结构、阵列式针-柱电极结构作为电晕放电离子源,在室温、大气压环境、无外界引入气流的条件下,通过气体放电实现了敞开式离子源和微型气泵功能的集成^[9-13],省去了庞大的载气系统。近年来, MEMS 技术和分析仪器很好地融合在一起,越来越多的仪器装置都向着微型化方向发展。目前, MEMS 离子源的不对称电极多采用硅工艺制作,虽然具有导电性好、易于集成设计等优点,但是硅电极在高压放电条件下存在易损伤、可靠性差等不足,相比之下,采用金属作为 MEMS 离子源的电极材料则能弥补硅电极材料的不足^[14,15]。为了进一步减小敞开式离子源和微型气泵集成系统的体积,在本课题组前期研究的基础上,本文采用 MEMS 技术设计并加工了基于 LIGA 工艺的微型针-柱结构芯片,并对其放电特性进行了研究。

2 实验装置

2.1 微型放电结构 MEMS 设计

为固定微型放电结构的针电极和柱电极,实现电气绝缘和形成气流通道的,本文采用绝缘材料 PMMA 设计并加工了上基板、中间基板和下基板。为避免复杂的套刻工艺,同样采用 PMMA 材料加工了针电极基座,用来固定针电极。微型放电芯片工作时,为便于样品的进样和电离,以及减少样品进样过程中的损耗,在下基板上开有半径为 0.75 mm 的进样孔,其位于针电极放电位置的正下方。芯片的整体尺寸为 11 mm×10 mm×2.3 mm,芯片的完整结构装配体示意图如图 1(彩图见期刊电子版)所示。

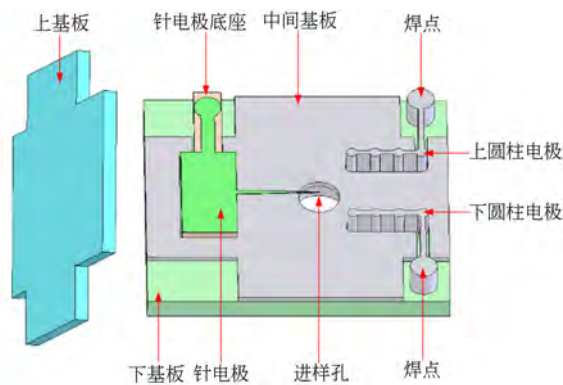


图1 微型放电芯片三维结构示意图

Fig.1 3D schematic of micro discharge chip

制作柱电极的 LIGA 工艺流程如图 2 所示,针电极的 LIGA 加工工艺与柱电极的制作流程相似。首先在钛基板上涂抹光刻胶,经同步辐射曝光、显影后,通过电铸铜工艺加工形成不同厚度的针、阵列式柱电极,再经过研磨、去胶,最后去除钛基板,得到单独的针电极和阵列式柱电极结构。柱电极采用德国 ALLRESIST 公司的 PMMA 光刻胶工艺,型号为 AR-P6510,在 160℃ 烘烤 50 min 后经 2.2 h 的同步辐射曝光,再用 R600-56 型号的显影液显影 8 h,接着用 AR600-70 的去胶液去除 PMMA。然后用溶液(成分为硫酸铜 200 g/L,硫酸 100 mL/L),通上 200 mA 电镀电流,在室温下电镀成 1 mm 高的柱电极,最后用 MTI 公司的 UNIPOL-802 研磨机将柱电极研磨平整。

电镀铜加工形成的针电极厚度为 20 μm,长度有 2 mm 和 3 mm 两种尺寸,针尖曲率半径为

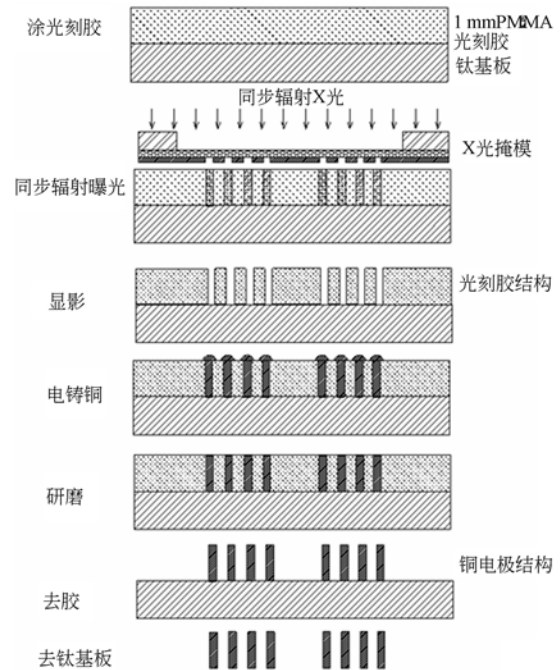


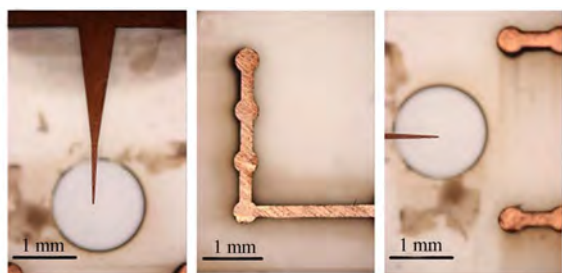
图2 LIGA 工艺流程图

Fig.2 Fabrication process of LIGA technology

10 μm。柱电极材料同样为电镀铜,其高度为 1 mm,圆柱直径为 0.4 mm,柱电极分为上圆柱电极和下圆柱电极,同一排的圆柱由 4 根圆柱等间距排列,圆心距为 0.9 mm。为了方便圆柱间的固定,形成气路通道,相邻圆柱均用宽度为 0.2 mm 的电镀铜连接起来,厚度为 1 mm,与圆柱保持同等高度。上圆柱和下圆柱之间的垂直圆心距为 3 mm,同时柱电极的末端设有焊盘,便于焊接导线。微型放电结构的针电极与柱电极(第一根圆柱)之间的垂直间距有 1 mm 和 2 mm 两种规格,LIGA 工艺加工的微型放电结构的针-柱电极如图 3(彩图见期刊电子版)所示。

2.2 放电回路

在室温、大气压环境下,针-柱电极间加载 0 ~ -5 000 V 的负直流高压,针电极与电源负直流高压电源的高压输出相连,柱电极接地。负直流高压电源两端并联用做放电结束后电源电压快速下调的放电电阻,阻值为 6 MΩ,针电极和负直流高压电源间串联 6 MΩ 的镇流电阻,用来抑制放电过程中电弧的产生。1 kΩ 的测试电阻两端分别并联 TDS1002B-SC 泰克示波器和万用表,分别用来观察放电过程产生的波形和测试电阻两端的电压,由此可计算出放电过程产生的回路电



(a) 针电极 (b) 柱电极 (c) 针-柱装配图
(a) Needle electrode (b) Cylinder electrode (c) Needle-cylinder assembly graph

图 3 LIGA 工艺加工的放电电极

Fig. 3 Discharge electrodes fabricated by LIGA technology

流值。微型放电结构的放电回路连接示意图如图 4 所示。

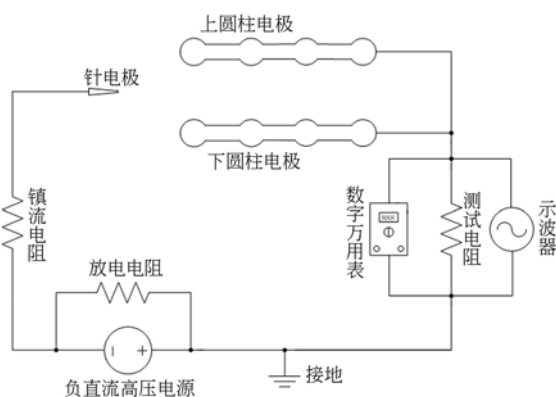


图 4 微型芯片的放电电路连接图

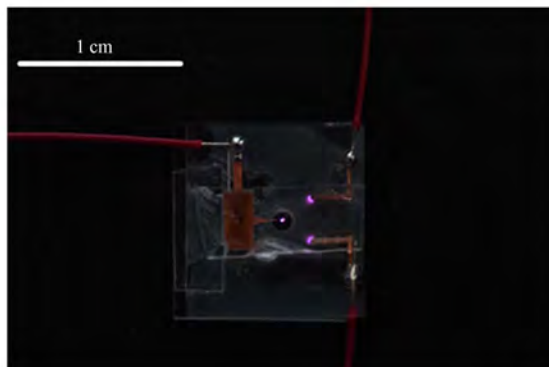
Fig. 4 Connection diagram of discharge circuit of micro chip

3 实验结果与分析

3.1 芯片放电实验

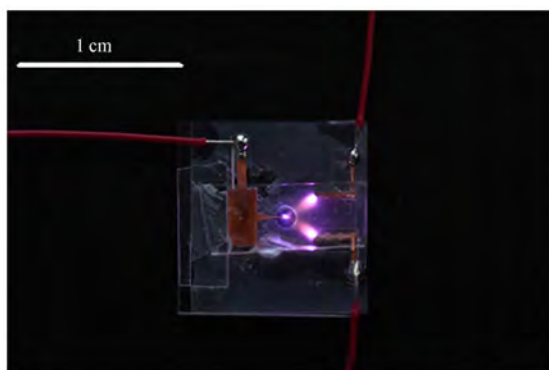
在室温、无外界通入气流、大气压条件下,分别对芯片针-柱间距为 1 mm 和 2 mm 的结构进行放电实验。按照图 4 所示放电电路将微型放电结构连入电路中,在 2 mm 规格的针-柱电极结构间加载负直流高压。随着加载电压的逐渐增大,在微型芯片的针尖处可观察到紫色的亮点,同时柱电极表面也出现淡淡的光晕,针和圆柱之间的大部分区域则没有出现放电发光现象,如图 5(a) (彩图见期刊电子版)所示。这说明此时针尖附近的场强最大,电离和激发主要发生在这一区域,该阶段为电晕放电阶段。随着负直流高压的继续增大,发光区域逐渐向上下圆柱方向扩展,且发光亮

度的体积越来越大,整个针和上下圆柱间的区域出现耀眼的紫色光芒,如图 5(b) (彩图见期刊电子版)所示,此时为辉光放电。



(a) 电晕放电

(a) Corona discharge



(b) 辉光放电

(b) Glow discharge

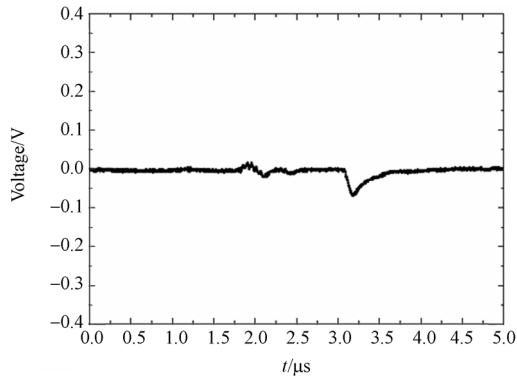
图 5 2 mm 规格的芯片电晕放电和辉光放电现象

Fig. 5 Corona discharge and glow discharge for chip with electrode gap distance of 2 mm

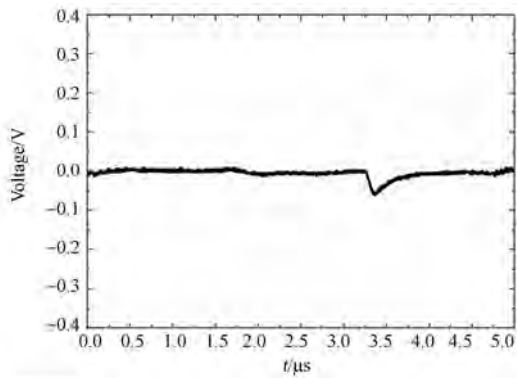
当微型芯片的针-柱间距为 1 mm 时,放电过程中通过示波器观测到的测试电阻两端的放电电压波形如图 6 所示。由图 6 可知,当电压加载到 -2 320 V,示波器上才观测到稳定的特里切尔波形,此时波形频率较低,不含直流分量,说明针-柱间开始出现电晕放电现象,如图 6(a)所示。随着负直流电压的逐渐增加,示波器上观测到的特里切尔波形幅值逐渐减小,频率逐渐增大,并且出现了直流分量,如图 6(b)-(d)所示。此时针-柱间放电由电晕放电向辉光放电阶段过渡。当负直流高压升高至 -2 553 V 时,示波器上观测到的放电波形脉冲消失,电压完全变成直流,此时放电进入辉光放电阶段,随着负直流高压的继续增加,辉光放

电将保持一段时间,如图 6(e)、(f)所示。

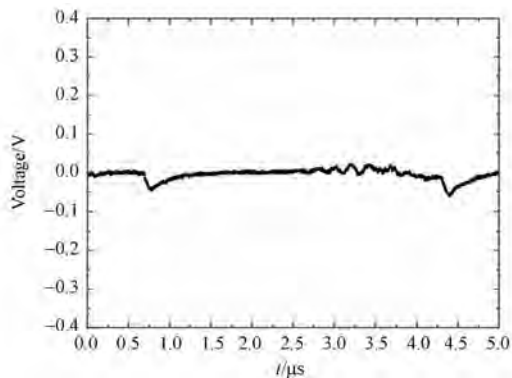
当微型芯片的针-柱间距为 2 mm 时,放电实验过程中,随着加载的负直流高压的逐渐增大,同样可以观察到电晕放电和辉光放电现象。当负直流高压为-3 050 V 时,示波器上开始出现电晕放电阶段特有的特里切尔波形,如图 7(a)所示。随着加载的负直流高压的逐渐增大,示波器观测到的波形幅值逐渐减小,频率逐渐增大,并出现了



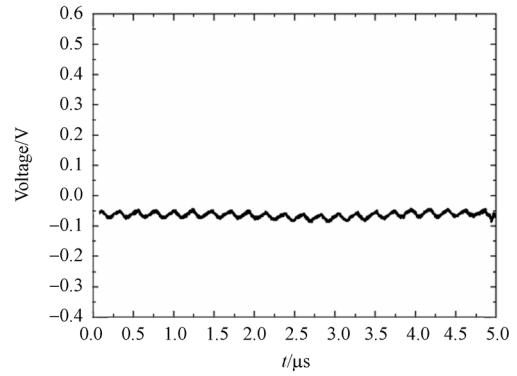
(a) -2 320 V



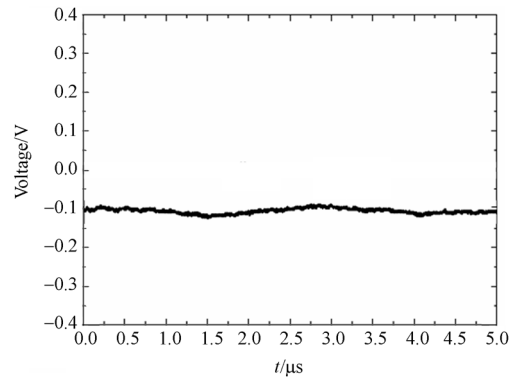
(b) -2 350 V



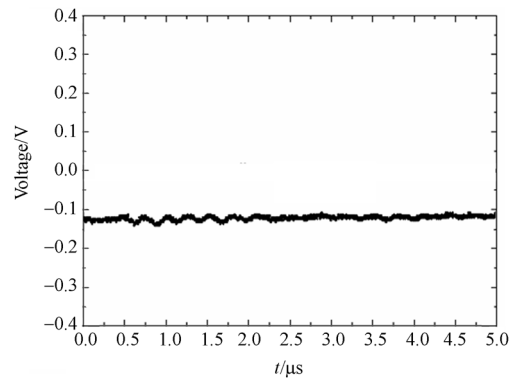
(c) -2 400 V



(d) -2 500 V



(e) -2 553 V



(f) -2 600 V

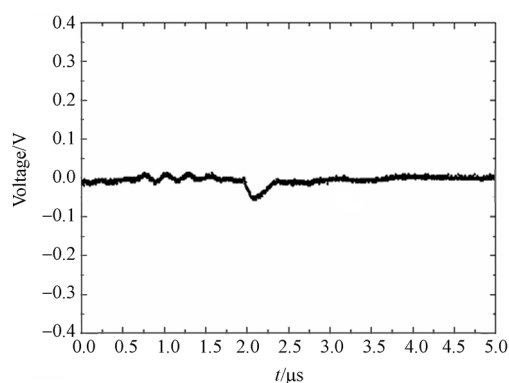
图 6 针-柱间距 1 mm 芯片的放电波形

Fig. 6 Discharge waveforms of chip with gap distance of 1 mm

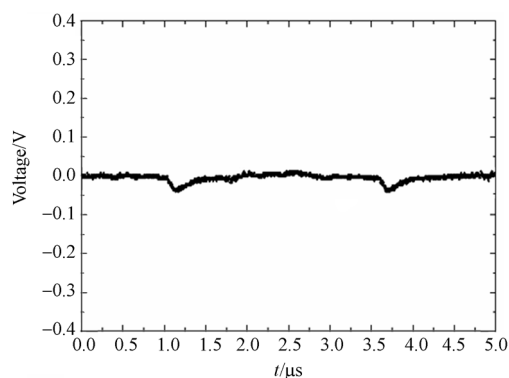
直流分量,如图 7(b)-(d)所示,此时微型芯片处于电晕放电向辉光放电过渡的阶段。当负直流高压增加至-3 563 V 时,示波器上波形脉冲消失,电压完全变成直流,并随着电压的继续升高保持辉光放电一段时间,如图 7(e)、(f)所示。

上述两种规格的微型放电结构的放电伏安特

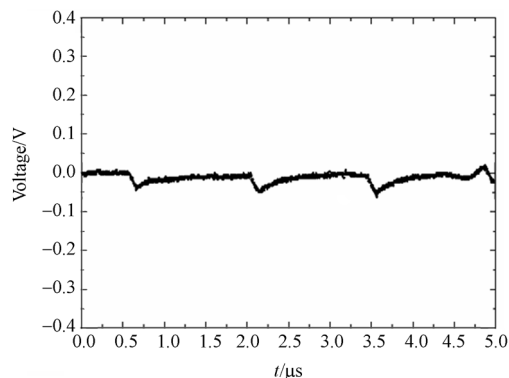
性如图 8 所示,电晕放电阶段,随着加载负电压的升高,放电回路产生的回路电流也逐渐增大,呈线性关系。当进入辉光放电阶段,回路电流与电晕放电产生的回路电流相比明显增大。另外,针-柱间距越大,进入电晕放电阶段的起晕电压也越大,同时各个放电阶段持续的时间也更长,进入火花放电的阈值电压也越大。



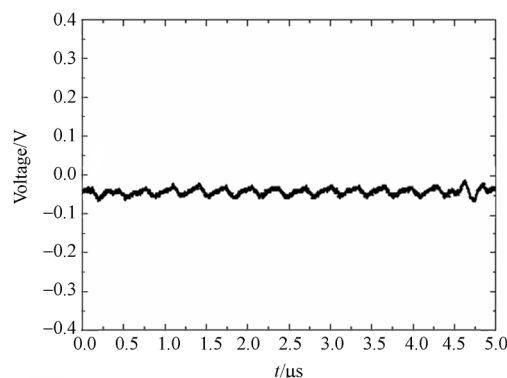
(a) -3 050 V



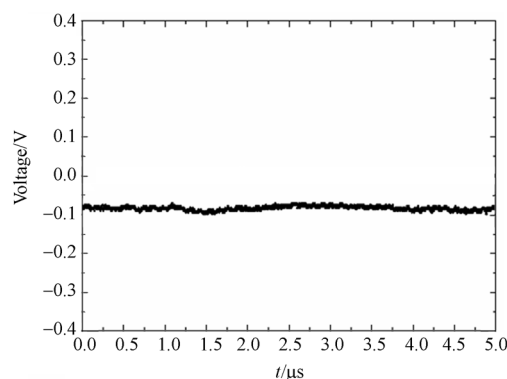
(b) -3 200 V



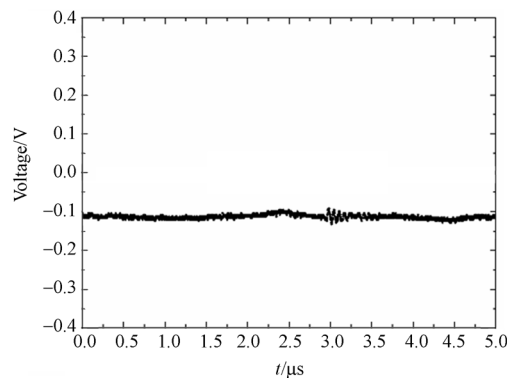
(c) -3400 V



(d) -3 500 V



(e) -3 563 V



(f) -3 600 V

图 7 针-柱间距 2 mm 的放电波形

Fig. 7 Discharge waveforms of chip with gap distance of 2 mm

3.2 离子风流速和乙酸进样电离实验

由图 9 可见,随着放电加载的负直流电压的增加,出现放电现象的同时还伴随着离子风的产生。针-柱间距为 1 mm 的芯片对应的放电电压区域为 -2 320 V ~ -2 600 V,而间距为 2 mm 的芯片对应的放电电压区域为 -2 950 V ~ -3 600

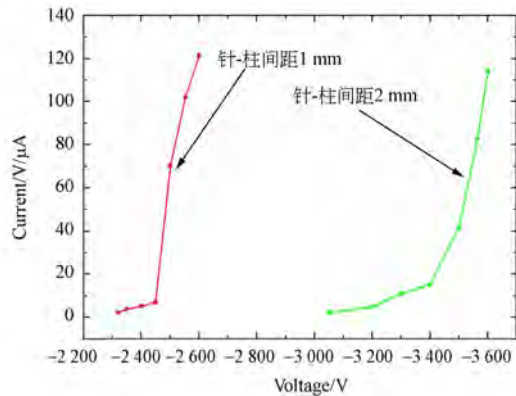


图8 两种规格微型芯片的电压-电流放电特性

Fig. 8 Volt-ampere characteristic curves of two kinds of micro chips

V。针-柱间距越大,相同电场强度所需的放电电压也越大,同时针-柱间距变大也有利于释放放电所产生的热量,因此放电电压范围也相应变大。另一方面,针-柱间距变大后,风速也随之增大,这是由于放电电压变大的同时电场强度也随之变大,从而引起离子风风速增加。此外,针-柱间距不同的芯片放电所产生的离子风风速具有类似的变化规律。针-柱间距规格为1 mm的微型芯片,当放电电压为-2 500 V时,产生的离子风流速最大,达0.4 m/s;随着负直流电压的继续增大,进入辉光放电阶段,此时离子风流速反而减小。针-柱间距规格为2 mm的微型芯片放电所产生的离子风流速的特性与规格为1 mm的微型芯片相似。当放电电压为-3 300 V时,放电产生的离子风流速最大,达0.79 m/s;且随着芯片放电进入辉光放电阶段,离子风流速不增反减。当芯片放电进入火花放电阶段,此时产生的离子风流速为0 m/s。芯片进入辉光放电阶段后,离子风流速减小是因为此时自由电子与空气中的中性分子发生了游离碰撞反应,没有过多地参与带动气流运动,只有放电边缘少部分离子参与形成离子风。所以在微型芯片进入辉光放电阶段后,离子风流速不增反减^[13]。

为验证微型芯片的气泵功能,本文还进行了乙酸的进样实验。使用针-柱间距规格为2 mm的微型芯片进行实验,取乙酸置于样品瓶中,并将样品瓶置于芯片进样口的正下方。加载负直流电压至-3 200 V,将被去离子水润湿的PH试纸放置于芯片出口处,可观察到PH试纸变红,如图

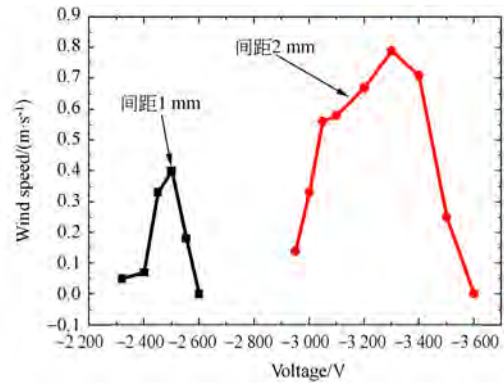


图9 两种规格芯片放电产生的离子风风速结果

Fig. 9 Ionic wind velocities produced by discharge of two kinds of chips

10(彩图见期刊电子版)所示。PH试纸变红充分表明微型芯片放电过程中可完成对挥发性乙酸的进样。

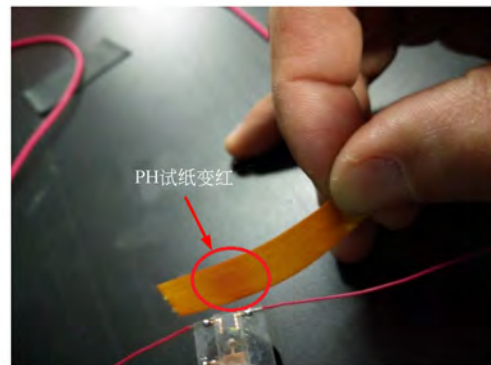


图10 乙酸进样实验

Fig. 10 Experiment of acetic acid injecting

微型芯片离子源的功能验证通过微弱电流检测系统实现。通过LABVIEW软件设置采样点数为50,采样频率为0.5 Hz,使用针-柱间距规格为2 mm的微型芯片,逐步加载负直流放电电压,测得的电流信号如图11所示。当放电电压为0 V时,检测系统采集的是环境噪声,信号为0.1 pA量级;当放电电压为-3 158 V时,检测到的电流信号达-20 pA;继续增大放电电压,当放电电压为-3 290 V时,电流信号为-60 pA左右;当放电电压升高至-3 300 V时,电流信号可达-120 pA。上述3种放电电压条件下检测到的电流信号稳定,且数值明显高于环境噪声信号0.1 pA,表明芯片实现了对乙酸的电离。

离子源作为分析仪器的一个关键部件,主要从两方面检验其性能:一是物理稳定性,主要表现

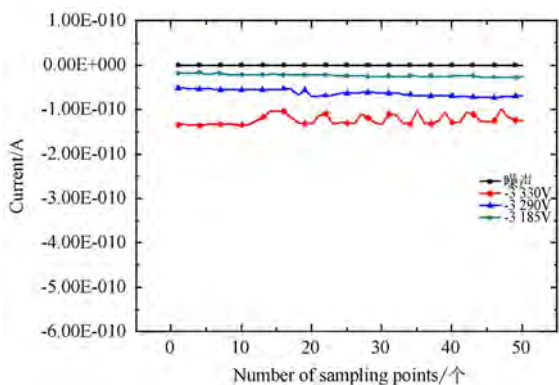
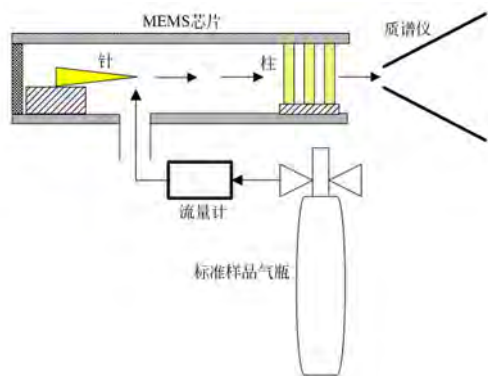
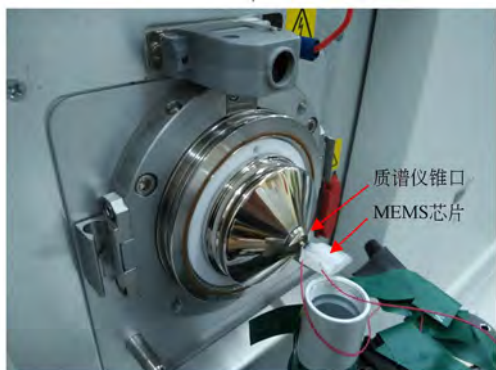


图 11 不同放电电压下检测到的电流信号
Fig. 11 Current signals at different discharge voltages

为电离所产生的离子电流值是否稳定;另一方面是化学可靠性,主要表现为电离物质所产生的主要离子是否为所需要的离子种类^[6]。本文所设计离子源的物理稳定性已经通过 Keithley 离子电流检测实验得到了验证(图 11)(彩图见期刊电子版)。为了验证离子源的化学可靠性,采用质谱仪



(a) 质谱仪实验系统框图
(a) Schematic diagram of MS experiment



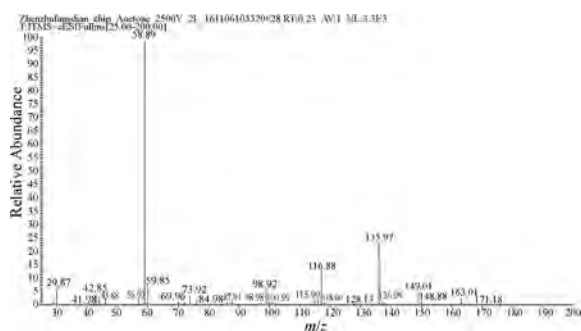
(b) MEMS 芯片和质谱仪联接
(b) A configuration of MEMS chip with MS

图 12 质谱仪检测实验装置

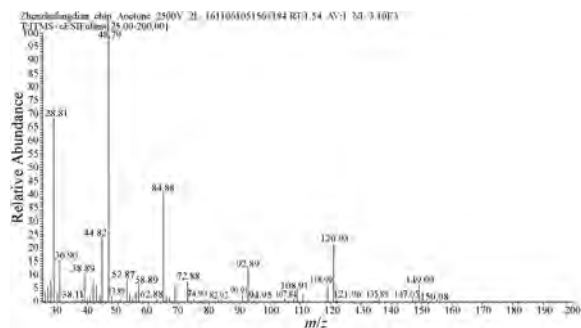
Fig. 12 Experimental set up of MS detector

对离子源电离物质得到的离子种类进行检测,如图 12 所示。

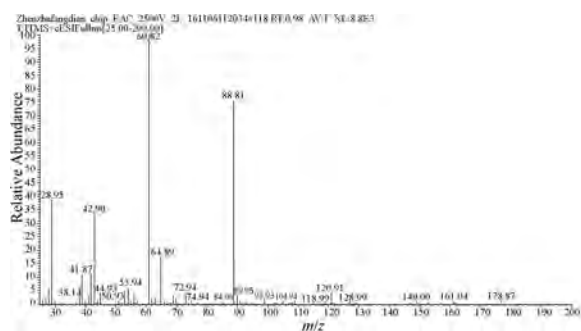
实验所用样品为丙酮、无水乙醇和乙酸乙酯的标准浓度样品气(北京华元气体化工有限公司,底气为氮气),浓度分别为 99.7、300 和 99.3 ppm。流量计为 D08-1F 型流量显示仪(北京七星华创电子股份有限公司)。质谱仪为 Thermo Scientific 公司 LTQ XL™ 离子阱质谱仪,其工作条件设置为温度 30 °C,锥口电压为 0 V,内部透镜电压自动获取。气体流速控制为 2L/min,选取针-柱间距 1mm 的 MEMS 芯片进行实验,放电电



(a) 丙酮
(a) Acetone



(b) 无水乙醇
(b) Absolute ethyl alcohol



(c) 乙酸乙酯
(c) Ethyl acetate

图 13 样品电离质谱仪谱图

Fig. 13 The mass spectra of sample ions

压为 $-2\ 500\ \text{V}$ 。质谱仪实验结果如图13所示。

由图13(a)可见,丙酮电离后的主要离子产物为质子化离子 $[\text{CH}_3\text{COCH}_3 + \text{H}]^+$ ($m/z: 59$)以及丙酮分子和离子聚合形成的二聚物离子 $[\text{CH}_3\text{COCH}_3 + \text{CH}_3\text{COCH}_3 + \text{H}]^+$ ($m/z: 117$)。无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) $m/z: 29$ 的离子为失去羟基后的 $[\text{C}_2\text{H}_5]^+$; $m/z: 45$ 的离子为 $[\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}]^+$,应为乙醇失去一个氢; $m/z: 64$ 的物质应为乙醇与水的聚合物 $[\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}]^+$;质荷比为47的离子峰是信号最大的主要峰,为乙醇质子化单体离子 $[\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}]^+$, $m/z: 93$ 的离子峰应为乙醇分子和离子聚合形成的二聚物离子。乙酸乙酯的主要离子峰为 $m/z: 61$ 以及 $m/z: 89$,其中 $m/z: 61$ 的峰为 $[\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2 + \text{H}-\text{CO}]^+$, $m/z: 89$ 的峰为 $[\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2 + \text{H}]^+$ 。由于在敞开式大气压环境下工作,因此上述离子产物除了样品的离子峰,还不可避免出现了杂质以及碎片离子峰。

本文所设计的MEMS芯片离子源电离物质所得到的离子电流值和离子产物同传统紫外灯离子源、电晕放电离子源相比,结果基本相同^[6, 16]。MEMS芯片离子源的物理稳定性和化学稳定性都得到了实验验证。

4 结 论

本文在前期的研究基础上,采用MEMS技术

设计并加工了微型针-柱放电结构,在室温、无外界气流通入、大气压强环境下,通过对放电电极间距1 mm和2 mm的微型针-柱放电结构加载负直流高压,能够实现稳定的电晕放电和辉光放电,并产生了最大流速为0.79 m/s的离子风。湿润的PH试纸变红则验证了微型放电结构的气泵功能,微弱电流检测系统测试到的电流信号(最大可达nA级别)和质谱仪离子检测实验(产物主要为单体离子和二聚物离子)证明了微型针-柱结构的电离物质功能。实验证明基于LIGA工艺的针-阵列式柱电极结构具有良好的放电稳定性和工作可靠性,且微型放电结构的尺寸比其他电晕放电离子源更小,用于便携式分析仪器中,有利于减小集成系统的体积,便于分析仪器的进一步微型化。其不足之处在于单个针-柱离子源所产生的离子风风速还较小,与质谱仪(MS)、高场非对称波形离子迁移谱(FAIMS)等分析仪器联用还需要其提供更大的离子风驱动力。

下一步的研究中将通过采用阵列式针-柱结构增大离子风流速,以得到更大的驱动力和气体流速。

5 致 谢

非常感谢清华大学精密仪器系唐飞老师和曾悦博士在质谱仪实验中给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] SABO M, KLAS M, WANG H, *et al.*. Positive corona discharge ion source with IMS/MS to detect, impurities in high purity Nitrogen [J]. *European Physical Journal Applied Physics*, 2011, 55 (1):532-542.
- [2] KUDRYAVTSEV A, MAKAS A, TROSHKOV M. The Features of corona discharge ion source for various classes of substances [J]. *International Journal for Ion Mobility Spectrometry*, 2003, 6: 207-211.
- [3] LIU X, LI SH L, LI M SH. Factors influencing the electron yield of needle-ring pulsed corona discharge electron source for negative Ion mobility spectrometer [J]. *Plasma Science & Technology*,

2013, 15(12):1215-1220.

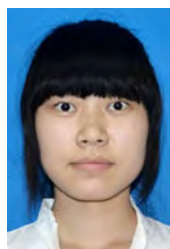
- [4] 粟大超, 李国卿, 檀景辉, 等. 采用脉冲电晕放电离子源的离子迁移谱仪[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12):3095-3101.
LI D CH, LI G Q, TAN J H, *et al.*. Ion mobility spectrometer using pulse corona discharge ion source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3095-3101. (in Chinese)
- [5] 刘坤, 廖崢, 侯世英, 等. 大气压直流辉光放电装置的实验与分析[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(3): 71-76.
LIU K, LIAO ZH, HOU SH Y, *et al.*. Experiment and analysis of an atmospheric DC glow discharge device [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(3):71-76. (in Chinese)
- [6] 唐飞, 王晓浩, 刘坤, 等. 敞开式小型线-筒电极负

- 电晕放电离子源[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1953-1957.
- TANG F, WANG X H, LIU K, *et al.*. Ambient negative corona discharge ion source with small line-cylinder electrodes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1953-1957. (in Chinese)
- [7] LIU K, WANG X H, FEI T, *et al.*. Realization of atmospheric pressure glow discharge ion source in small gap with precise electrode structure[J]. *Nami Jishu Yu Jingmi Gongcheng/nanotechnology & Precision Engineering*, 2010, 8(3):189-194.
- [8] GUO CH A, TANG F, CHEN J, *et al.*. Development of dielectric barrier discharge ionization technique [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2015, 407(9):2345-2364.
- [9] LI H, GUO CH Q, LI Y K, *et al.*. Effects of atmospheric-pressure discharge type on ionic wind velocity for needle-to-cylinder electrode [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2016, 34: 031308-1-031308-8.
- [10] 李华, 韦昌严, 曾德查, 等. 针-柱结构敞开式离子源和微型气泵集成系统的放电特性[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6):1531-1537.
- LI H, WEI CH Y, ZENG D CH, *et al.*. Discharge properties of integrated system of ambient ion source and micro air pump based on needle-to-cylinder structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1531-1537. (in Chinese)
- [11] 李华, 李玉凯, 郭超群, 等. 利用离子风实现后吸式进样与电离集成的离子源[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12):3405-3413.
- LI H, LI Y K, GUO CH Q, *et al.*. Ion source with posterior suck sampling and ionization by ionic wind [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3405-3413. (in Chinese)
- [12] 李华, 李玉凯, 郭超群, 等. 采用离子风实现敞开式离子源和微型气泵集成系统的设计与实验[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(9):1112-1118.
- LI H, LI Y K, GUO CH Q, *et al.*. Integration of ion source and micro pump with ionic wind [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(9):1112-1118. (in Chinese)
- [13] 郭超群, 陈耀彬, 李玉凯, 等. 小间隙针-柱结构电晕放电和辉光放电实现离子风的特性[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(2):112-117.
- GUO CH Q, CHEN Y B, LI Y K, *et al.*. Characteristics of ionic wind realized by corona discharge and glow discharge with a small gap needle-cylinder structure [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(2):112-117. (in Chinese)
- [14] 孔祥东, 张玉林, 宋会英. LIGA 工艺的发展及应用[J]. 微纳电子技术, 2004, 41(5):13-18.
- KONG X D, ZHANG Y L, SONG H Y. Development and application of LIGA technology[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2004, 41(5): 13-18. (in Chinese)
- [15] 南雪莉, 张斌珍, 张少华, 等. 基于 UV-LIGA 工艺的酸性电铸铜溶液最优化配比[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(29):265-270.
- NAN X L, ZHANG B ZH, ZHANG SH H, *et al.*. The optimal ratio of acid copper electroforming solution based on UV-LIGA process [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(29):265-270. (in Chinese)
- [16] LI H, WANG X H, TANG F, *et al.*. Separation of ions from volatile organic compounds using high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry-mass spectrometer [J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2010, 23(2):125-132.

作者简介:



李华(1978—),男,湖南郴州人,博士,教授,硕士生导师,2001年、2004年于中北大学分别获得学士、硕士学位,2007年于北京理工大学获得博士学位,2010年于清华大学仪器科学与技术博士后流动站出站,目前主要从事微型生化分析仪器和 MEMS 等的研究。
E-mail:lihua@guet.edu.cn



郭超群(1993—),女,湖南株洲人,硕士研究生,2014年于吉首大学获得学士学位,目前主要从事微型分析仪器的研究。E-mail:15107429521@163.com

(本栏目编辑:李自乐)