

文章编号 1004-924X(2010)12-2597-06

用于高场非对称波形离子迁移谱系统的 阵列式微法拉第筒离子检测器

唐 飞, 王晓浩, 张 亮

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:提出了一种可减小高场非对称波形离子迁移谱 (FAIMS) 系统体积的阵列式微法拉第筒离子检测器, 该检测器具有结构简单、稳定性好、噪声小、量程大、可在大气压条件下工作等优点。阵列式微法拉第筒包括栅电极、敏感电极、屏蔽电极 3 部分, 其中敏感电极由数十个直径为 200 μm 的硅圆柱交错排列而成。通过典型的 MEMS 工艺制作, 法拉第筒与平板型 FAIMS 系统的 MEMS 工艺完全兼容。Fluent 仿真结果表明, 这种阵列式的设计, 气体运动阻力较小, 流场分布有助于载气中离子被充分吸收。与 KEITHLEY 237 电流表级联后, 测得阵列式微法拉第筒的噪声水平在 0.5 pA 以下。对丙酮样本进行了实验测试, 结果显示其输出信号为 210 pA 左右, 表明该阵列式微法拉第筒满足 FAIMS 系统的要求。

关键词:高场非对称波形离子迁移谱; 微机电系统; 法拉第筒; 离子检测器; 微弱电流

中图分类号: TL811 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2597

Array micro Faraday cup ion current detector for FAIMS

TANG Fei, WANG Xiao-hao, ZHANG Liang

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An array micro Faraday cup ion current detector is presented. With its design, a simpler and smaller High-field Asymmetric Waveform Ion Mobility Spectrometry (FAIMS) could be achieved. Compared with other types of detectors, it has advantages in simplicity, stability, low noise, high measuring range, and atmosphere compatibility. The Array Micro Faraday Cup (AMFC) is made up of three parts: grid electrode, sensing array and shielding electrode, in which the sensing array is formed by dozens of 200-micron-diameter silicon cylinders in a staggered arrangement. The structure of the micro Faraday cup can be fabricated in a typical MEMS fabrication process, for it is totally compatible with the planar FAIMS micro chip. Fluent simulation results show that the design could realize a small fluid resistance force, and the flow field of the carrier gas is in favor of a better absorption of the ions. When it is combined with a KEITHLEY 237 electrometer, the noise level of the AMFC is about 0.5 pA, while the output signal of an acetone sample is about 120 pA. Obtained results show that the AMFC satisfies the requirements of FAIMS systems.

收稿日期: 2010-03-16; **修订日期:** 2010-05-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60706030); 国家自然科学基金仪器专项资助项目 (No. 20827007); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA04Z337)

Key words: High-field Asymmetric Waveform Ion Mobility Spectrometry (FAIMS); Micro-electronic-mechanical System (MEMS); Faraday cup; ion detector; low current

1 引言

高场非对称波形离子迁移谱系统 (High-field Asymmetric Waveform Ion Mobility Spectrometry, FAIMS) 具有便携、快速、低功耗、低成本、高灵敏度等优点,已在物质检测领域受到越来越广泛的重视。其基本原理是:通过离子在射频高压电场下迁移率的不同,对物质的种类和浓度进行检测^[1-2]。高灵敏度的 FAIMS 系统对离子检测器的要求很高,目前其面临的问题主要有:(1)强电磁干扰。为了实现高灵敏度的检测,必须抑制 FAIMS 迁移区的射频高压电场、人体静电及其它环境噪声。(2)检测环境为大气。这限制了电子倍增器等离子检测器件的应用^[3]。(3)离子信号微弱。为了检测 10^{-9} 级浓度的气体,典型的 FAIMS 系统产生的信号强度在 pA 量级。

法拉第筒具有结构简单、易于微型化、量程大、稳定性高、可以在真空和大气压环境下工作等优点,已广泛应用于高能带电粒子束流强度检测^[4]、太阳离子风检测^[5]、带电微粒检测^[6-7]等领域,并成为 FAIMS^[1-2]、离子迁移谱 (Ion Mobility Spectrometry, IMS)^[8]、微型质谱仪^[9]等分析仪器的首选。典型的法拉第筒结构主要包括抑制栅极、屏蔽壳和敏感极^[11],有静态与动态两种工作模式。动态模式中,带电粒子与法拉第筒不接触,通过感生电流来检测带电粒子的束流强度^[10]。静态模式中,带电粒子与法拉第筒敏感极碰撞,通过电荷的转移来检测带电粒子束流的强度。本文的研究是针对静态模式法拉第筒而言的。

传统法拉第筒的研究主要包括:减少二次电子的发射,提高二次电子的捕获能力,以及提高法拉第筒检测器的功率等^[12-14]。另外,国外一些研究小组正在致力于将法拉第筒阵列用 MEMS 工艺微型化,以提高带电粒子束流的位置检测分辨率^[13-15]。由于应用领域不同,传统法拉第筒检测的带电粒子束流强度大(甚至达到 1 A 以上)、能量高(达 1 MeV 甚至 1 GeV)、需要工作在真空条件下。这些特点使得传统的法拉第筒在抗电磁干扰能力、使用环境、结构等方面不符合 FAIMS 系

统的要求。

随着 IMS、微型质谱仪等分析仪器的出现,法拉第筒也开始向检测能量低、结构微型化的方向发展,但由于这些设备中离子牵引是依靠电场进行的,且都无射频高压电场的影响,另外微型质谱仪还需要真空环境,所以这些法拉第筒在气路设计、抗电磁干扰方面并不能满足 FAIMS 系统的要求。美国的新墨西哥州立大学设计了一种用于 FAIMS 的法拉第筒,采用简单的平板结构,由于无法实现良好屏蔽,受外界环境噪声的影响较大^[16],另外平板式的设计必须附加驱动电极,以使离子向敏感极偏转,这增加了系统的复杂性。

本文提出了一种新的应用于平板型 FAIMS 系统的阵列式微法拉第筒离子检测器,介绍了其结构和加工工艺,并进行了仿真和实验。结果表明,该法拉第筒离子检测器可以满足 FAIMS 系统的要求。

2 结构与工艺

设计的微法拉第筒采取玻璃-硅-玻璃的三明治结构(如图 1 所示)。法拉第筒的气路由上下玻璃片与硅片的侧壁构成。中间硅片层采用低阻硅材料,实现了良好的导电性能。离子与低阻硅表面碰撞时,在电场作用下,离子被中和,实现电荷从离子到低阻硅的转移。通过测量低阻硅采集的电流就可以测量出离子的束流强度。法拉第筒的敏感电极由几十个直径和间距均为 $200 \mu\text{m}$ 的硅柱经阵列交错排布组成,阵列式的排布在敏感电极中形成了许多微细的气体通路。当离子在载气的驱动下进入法拉第筒后,在错综复杂的微细通路中与硅柱发生了多次碰撞,最终被敏感阵列捕获。捕获的离子信号由玻璃片上的电极引出,并由灵敏电流表读出。由于检测的是电流信号,对硅与金属引线之间的接触阻抗特性要求不高,从而降低了对芯片加工工艺的要求。在敏感阵列的气路前端设置有栅电极,栅电极由单排数个直径为 $200 \mu\text{m}$ 的硅柱组成,栅电极材料也为低阻硅,使用时可以加一定的电压;栅电极的存在会造成部分离子信号的损失,造成芯片灵敏度的降低,

但其存在可以减弱离子在未达到敏感电极时,在敏感电极上产生的感应信号。敏感阵列的气路下游是屏蔽电极,也是由单排数个直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的硅柱组成。相比栅电极,它的硅柱排列更加紧密。屏蔽电极与栅电极以及侧壁一起构成了敏感阵列的屏蔽结构,降低了环境噪声对敏感阵列的干扰。

这种阵列式微法拉第筒相比于以前的法拉第筒有以下的优点:(1)敏感电极采用阵列式设计,扩大了气体与敏感电极的接触面积;在敏感电极中形成许多分散的微气流通道,可以破坏气体进入敏感阵列后的稳定流场,使气体中的离子更容易与敏感电极发生碰撞;由于载气驱动离子从敏感电极间流过,省去了驱动电极。(2)栅电极、屏蔽电极及导电侧壁能够对敏感电极进行良好的屏蔽,提高了法拉第筒的检出限。(3)离子在到达敏感电极前,会由于电磁感应而在敏感电极上形成感生电流。栅电极的存在能够大大减小电磁感应现象,减小敏感电极上的感生电流。

硅片采用厚 $200\ \mu\text{m}$ 、电阻率为 $0.0001\sim 0.0009\ \Omega\cdot\text{m}$ 的 $7.5\ \text{cm}(3\ \text{in})$ n 型圆片。玻璃采用厚为 $500\ \mu\text{m}$ 的 $7.5\ \text{cm}(3\ \text{in})$ 双抛圆片。具体工艺流程如图 2 所示:(1)下玻璃表面沉积 Au/Cr 电极,厚度为 $300\ \text{nm}/30\ \text{nm}$ 。金属膜用 lift-off 工艺光刻出电极,电极的线宽为 $100\ \mu\text{m}$ 左右。(2)硅片与下玻璃片阳极键合。(3)ICP 刻蚀硅片,深度为硅片的厚度,即 $200\ \mu\text{m}$ 。刻蚀后的芯片的电镜照片如图 3 所示。(4)硅片与上玻璃片阳极键合。

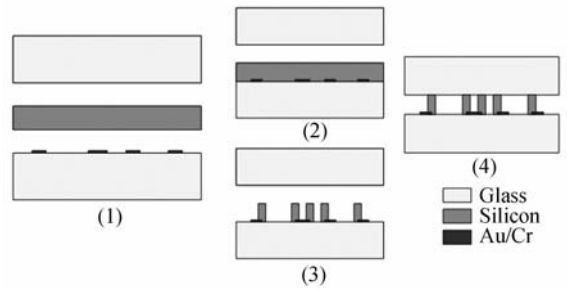


图 2 MEMS 加工工艺流程

Fig. 2 MEMS fabrication process

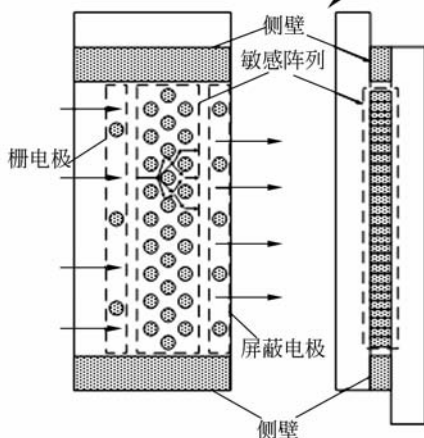
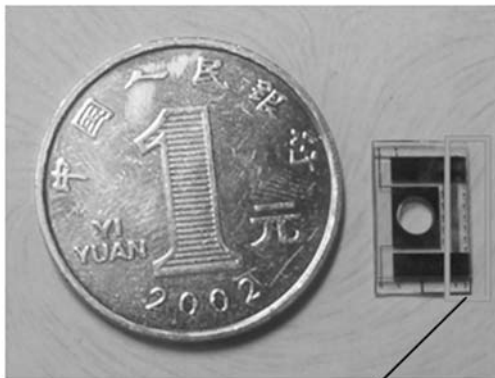


图 1 阵列式微法拉第筒

Fig. 1 Array micro Faraday cup

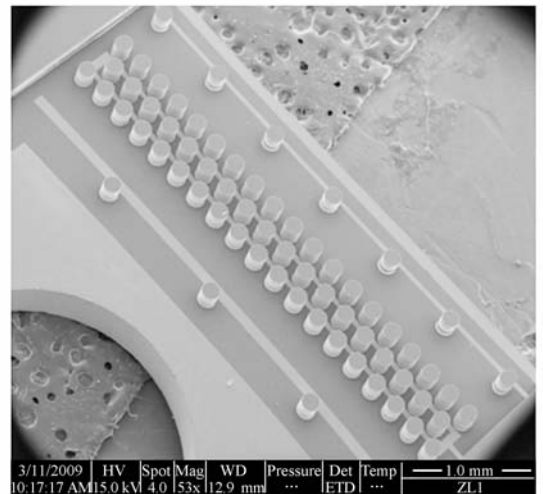


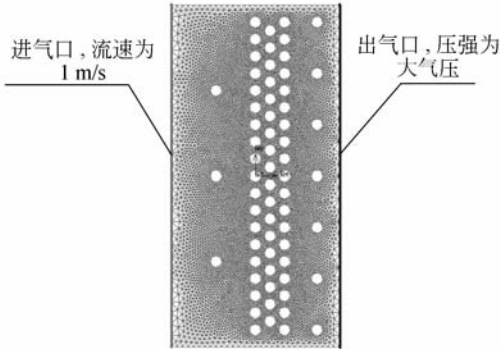
图 3 电镜照片

Fig. 3 SEM photo

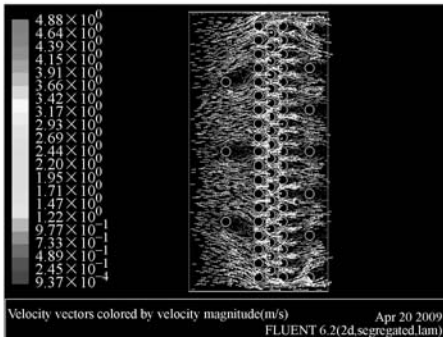
3 流体仿真

离子是靠载气驱动的。载气在法拉第筒中的流场状态直接决定了离子能否被法拉第筒充分接收。用 Gambit 和 Fluent 对载气的流场进行了 2D 仿真分析。边界条件为:进气口载气流速为

1 m/s, 出气口压强为大气压, 介质为空气, 如图 4(a)。



(a) 边界条件
(a) Boundary conditions



(b) 流场分布
(b) Flow field in array micro Faraday cup area

图 4 流场仿真

Fig. 4 Fluent simulation

流场仿真结果表明, 载气流经芯片后, 静压强变化只有 33.4 Pa, 最大流速为 3.05 m/s, 说明载气流经法拉第筒的阻力不大, 对载气驱动装置的要求不高。载气流经法拉第筒敏感阵列时的流场分布如图 4(b), 可以看出这种阵列式设计, 有利于离子与敏感阵列区中的硅柱发生碰撞, 从而利于载气中离子的充分吸收。

4 实验

为了验证阵列式微法拉第筒的性能, 用 KEITHLEY 237 对芯片进行了测试, 实验系统如图 5 所示。载气为氮气, 样品为丙酮, 丙酮浓度为 1.0×10^{-4} 左右。首先, 在气体流量为 0 时, 分别测定了在微法拉第筒前端的上下电极上加和不加

射频(RF)高压时(频率 200 kHz, 峰值 300 V)芯片的噪声水平, 结果显示芯片的噪声水平不受 RF 电场的影响, 都在 0.5 pA 以下, 如图 6。当气体流量稳定在 100 L/h 时, 实际测量的信号水平在 210 pA 左右, 如图 7。实验结果表明了这种阵列式微法拉第筒能够良好地屏蔽环境中的噪声, 同时能实现载气中离子的收集。

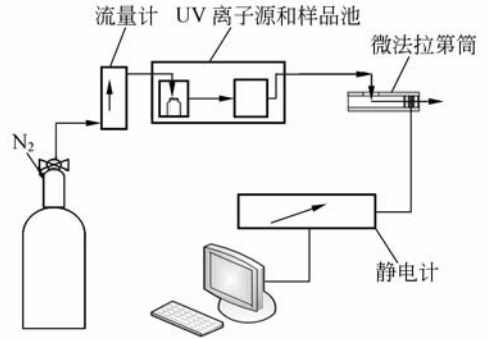


图 5 系统实验装置

Fig. 5 Schematic of experimental system

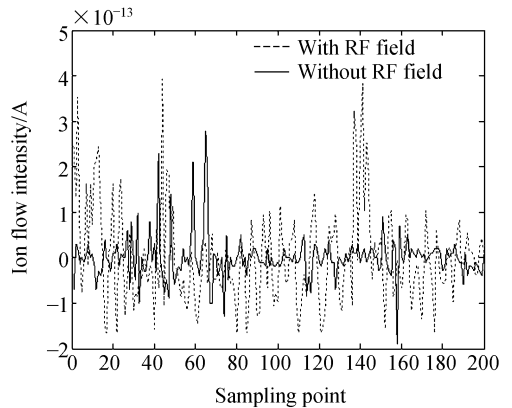


图 6 噪声曲线

Fig. 6 Curve of noise

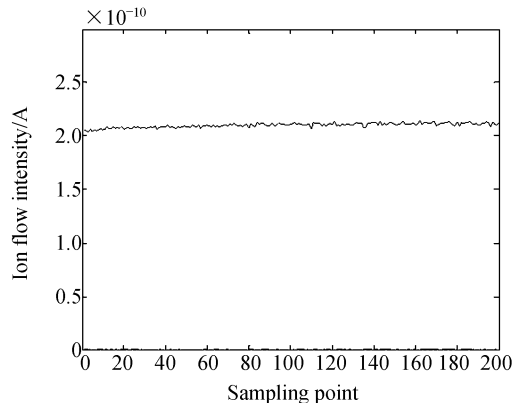


图 7 丙酮信号曲线

Fig. 7 Signal curve of acetone

5 结 论

本文研制了一种阵列式微法拉第筒,该法拉第筒可在大气环境下工作,结构简单、屏蔽性能

好,能够实现 0.5 pA 的噪声水平,可作为平板型 FAIMS 的离子检测装置。由于工艺的兼容性,二者可以实现 MEMS 工艺的集成设计,使 FAIMS 的结构更加简单,体积更加微小。

参考文献:

- [1] MILLER R A. A novel micromachined high-field asymmetric waveform-ion mobility spectrometer [J]. *Sensors and Actuators B*, 2000, 67(3): 300-306.
- [2] GUEVREMONT R. High-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry; a new tool for mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, 1058(1-2): 3-19.
- [3] FRAGA F A F. CCD readout of GEM-based neutron detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, 478(1-2): 357-361.
- [4] CHIARI M. Measurement of low currents in an external beam set-up [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2002, 188(1-4): 162-165.
- [5] KOVAL A. A new approach to solar wind monitoring [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(1): 153-159.
- [6] MCCOWN R. Comparison of two particle charging experiments for testing the JSC mars-1 martian regolith simulant against man-made materials [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, 12(4): 821-826.
- [7] 吴保军, 江游, 高印寒, 等. 四极质谱检测中复合放大器的低噪声高带宽设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1767-1770.
WU B J, JIANG Y, GAO Y H, *et al.*. Low-noise and wide-hand design of composite preamplifier in quadrupole mass spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1767-1770. (in Chinese)
- [8] 时迎国. VUV 电离离子迁移谱技术在 VOCs 测量中的应用 [D]. 大连: 中国科学院大连化学物理研究所, 2006: 27-35.
SHI Y G. *Application of VUV-Ion mobility Spectrometry for the Analysis of Volatile Organic Compounds* [D]. Dalian: Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 27-35. (in Chinese)
- [9] SILLON N, BAPTIST R. Micromachined mass spectrometer [J]. *Sensors and Actuators B*, 2002, 83(1-3): 129-137.
- [10] KUCEROVSKY D, KUCEROVSKY Z. Analysis of the dynamic Faraday cup [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003, 36(19): 2407-2416.
- [11] WETHEKAM S, WINTER H. Study on interactions of He atoms and ions with an Al(1 1 1) surface [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2007, 258(1): 7-12.
- [12] THOMAS J D, HODGES G S, SEELY D G, *et al.*. Performance enhancement study of an electrostatic Faraday cup detector [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2005, 536(1-2): 11-21.
- [13] DARLING R B. Micromachined Faraday cup array using deep ion reactive ion etching [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, 95(2-3): 84-93.
- [14] BOWER C A, GILCHRIST K H, LUECK M R, *et al.*. Microfabrication of fine-pitch high aspect ratio Faraday cup arrays in silicon [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, 137(2): 296-301.
- [15] KNIGHT A K, SPERLINEA R P, HIEFTJE G M, *et al.*. The development of a micro-Faraday array for ion detection [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2002, 215(1-3): 131-139.
- [16] PAPANASTASIOU D, WOLLNIK H, RICO G, *et al.*. Differential mobility separation of ions using a rectangular asymmetric waveform [J]. *J. Phys. Chem. A*, 2008, 112(16): 3638-3645.

作者简介:



唐 飞(1973—),男,博士,讲师,1995年、1997年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2003年于清华大学获得博士学位,主要研究方向为精密测量和控制技术、微系统设计和工艺等。E-mail: tangf@mail. tsinghua. edu. cn



张 亮(1983—),男,清华大学精密仪器及机械学系硕士研究生,主要从事离子电流检测器件和 MEMS 方向的研究。E-mail: liang-zhang03@mails. tsinghua. edu. cn



王晓浩(1971—),男,博士,副教授,1994年、1999年于清华大学分别获得学士、博士学位,主要研究方向为科学仪器、微型机电系统和微型飞行器。E-mail: xhwang@mail. tsinghua. edu. cn

● 下期预告

深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计

赵 阳^{1,2}, 巩 岩¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

为了使曝光波长为 193 nm 的深紫外光刻系统能够实现 90 nm 及以下节点的集成电路芯片的制备,要求采用环形照明模式,并针对掩模面上不同曝光线宽,要求部分相干因子 σ 在一定范围内可以连续调节。文献报道的轴锥镜光束整形单元只给出了锥角在 10° 以内的放大倍率近似计算公式,而且 σ 的调节范围受到轴锥镜固有特性的约束,不能任意调节。本文对实现环形照明模式且 σ 可调的光刻照明系统光束整形单元进行了设计。首先,用几何光学定律和三角函数推导了光束整形单元放大倍率计算公式。然后根据对变倍凸轮的可行性和装调公差灵敏度两方面的分析,确定了轴锥镜组参数的变化范围。最后设计了变倍镜组与轴锥镜组合的光束整形单元。设计结果表明, $\Delta\sigma$ 和 σ_{outer} 分别在 $[0.25, 1]$ 和 $[0.4, 1]$ 范围内连续调节,满足设计要求。