

文章编号:1674-8190(2013)03-327-06

隔热背腔式柔性热膜探头的设计及其微加工

马炳和,郝日鹏,邓进军,朱鹏飞

(西北工业大学 空天微纳系统教育部重点实验室,西安 710072)

摘要: 为了进一步提高器件性能,设计一种新型隔热背腔式柔性热膜传感器探头结构。借助流体传热耦合仿真和动态响应分析等,确定背腔结构参数;研发针对隔热背腔式柔性热膜探头的双面图形化微加工工艺,获得新型传感器件。对静/动态特性进行对比测试,结果表明:在相同的输入被测量情况下,新结构器件的输出信号量值提高了20%,时间常数由400 μs 减小到220 μs ,器件的灵敏度和动态响应性能都获得了有效提升。

关键词: 柔性热膜;隔热背腔;仿真;微加工

中图分类号: TP212; V261

文献标识码: A

Design and Micromachining of Flexible Hot Film Sensor with Insulating Cavity Underneath

Ma Binghe, Hao Ripeng, Deng Jinjun, Zhu Pengfei

(Key Laboratory of Micro/Nano Systems for Aerospace of the Ministry of Education,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To improve the sensitivity and dynamic performance, presented a new type of flexible hot film sensor with a cavity underneath for thermal insulation. With FVM simulation and dynamic performance analysis, the structural parameters of the cavity were determined. The double side micromachining processes of flexible hot film sensor with the cavity underneath were proposed. The static and dynamic performance of two kinds of sensor were studied in wind tunnel. Compared with the sensor without cavity, the new sensor shows 20% output increase with the same input and time constant drop from 400 μs to 220 μs . This means higher sensitivity and dynamic response speed were obtained.

Key words: flexible hot film; insulating cavity; simulation; micromachining

0 引言

采用微加工工艺制作的柔性热膜探头具有尺寸小、功耗低、易于分布式测量等优点。将其置于流体边界层内,通过与被测运动流体换热可以实现流体流速、温度、壁面剪应力等流动参数的非破坏性测量,在航空航天、河海工程、工业控制以及热式

流量计等流动测量领域具有广阔的应用前景。国内外竞相开展研究,马炳和等^[1]研发了聚酰亚胺基全柔性热膜微探头阵列,U. Schmid等^[2]研究了柔性热膜风速计背引线技术,Tan等^[3]研究了柔性热膜式流量计技术。Urich Buder等^[4]在聚酰亚胺基底上通过正面刻腔形成壁面热敏传感器来提高器件性能,然而这样做会导致器件强度下降,丧失了热膜相对热线而言更耐振动冲击的优良特性。

为了进一步提高传感性能,本文设计加工一种新型具有隔热背腔结构的柔性热膜传感探头,测试表明其输出信号量值、灵敏度、动态特性均得到了有效提高。

收稿日期:2012-12-05; 修回日期:2013-02-25

基金项目:国家自然科学基金(50775188)

通信作者:郝日鹏,haoripeng@163.com

1 隔热背腔结构参数设计

柔性热膜探头一般基于热平衡原理来间接感测流速、壁面剪应力等流动参数,热敏元件施加驱动电流产生焦耳热和温升,其热量散失主要分为两部分:一部分通过强制对流换热形式传递给运动流体,属于敏感探测有效散热,其所占比例越大,越有利于提高器件敏感性能和响应速度^[5];另一部分以热传导形式从热敏元件散失到衬底,虽然聚合物基底相对于陶瓷等无机物基底而言,这部分散热会显著减小,但却不可忽略,需要采用各种措施尽可能地加以抑制。

本文提出在柔性衬底上设计加工专门的隔热背腔结构,以有效降低热敏元件向衬底的热传导散热损失。隔热背腔式柔性热膜探头结构如图1所示。背腔结构参数主要包括背腔深度 h 、背腔宽度 b 、背腔长度 l 等。

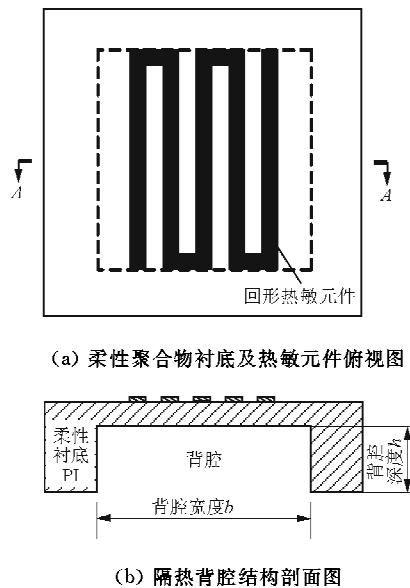


图1 隔热背腔式柔性热膜探头结构示意图

Fig.1 Structure of flexible hot film sensor with insulating cavity underneath

在设计过程中,借助流体传热耦合仿真等研究结构参数对灵敏度、动态性能的影响,获得了合适的结构参数值。

1.1 器件敏感热效率分析

为了确定背腔结构参数并分析其性能,建立包含热敏元件、衬底、背腔、空气流等不同单元类型的

三维流固传热分析模型;采用 Fluent 有限体积法(FVM)进行器件敏感热效率的仿真模拟,并考虑了背腔深度 h 、宽度 b 的影响。

为简化运算,将传感器的多折回形热敏元件简化为单折结构,隔热背腔取和热敏元件相同的长度 l 为0.5 mm,聚酰亚胺(PI)衬底总厚度为50 μm ,在热敏元件上施加5 mW的固定焦耳加热功率。

流动采用层流模型、SIMPLE 算法,动量和能量方程采用一阶迎风格式^[6]。设定气流初始温度为25 $^{\circ}\text{C}$,气体流速一直为5 m/s,在热敏元件上施加5 mW的加热功率进行单折热敏元件不同深、宽尺寸的背腔结构数值模拟。

以宽为0.3 mm、深为40 μm 的背腔结构为例,求解结果包括温度云图和表面热流率数据,其中温度云图结果如图2所示。

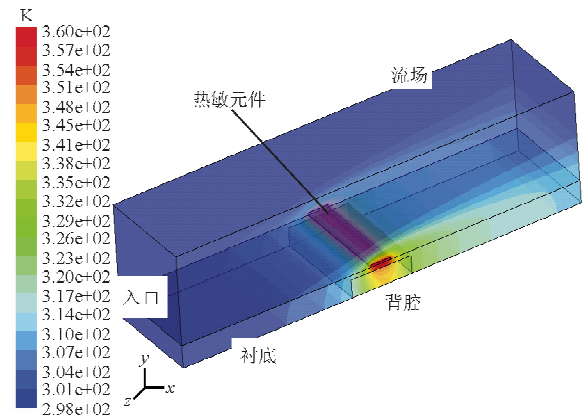


图2 仿真得到的温度分布云图

Fig.2 Temperature distribution with FVM simulation

从图2可以看出,在通电后热敏元件的温度最高为87 $^{\circ}\text{C}$,周围流场和传感器衬底均被加热,在流场和衬底沿上下游都有一个热影响区。

对热敏元件上表面和垂直于流向的两个平面提取表面热流率,再分别乘以该面的面积得到热敏元件与流体的对流换热功率为3.510 2 mW,同样提取热敏元件下表面的表面热流率,乘以该面的面积得到热敏元件与衬底热传导功率为1.488 9 mW,两者之和为4.999 1 mW,占传感器5 mW总加热功率的99.9%,说明这两部分确实占据了热敏元件的绝大部分散热量,两者分别占热敏元件焦耳加热功率的70.2%和29.7%。

灵敏度是热膜探头的主要静态性能指标之一,体现了传感器对被测量(如流体流速、剪应力等)变

化的相对敏感程度。引入“敏感热效率”来描述热敏元件向被测运动流体对流散热量占焦耳加热总功率的比例。在流体流速、剪应力等被测量不变的情况下,敏感热效率越高,越有利于获得比较大的输出信号,越有利于获得更高的器件灵敏度。

为了研究背腔结构参数对柔性热膜探头性能的影响,改变背腔深度 h 、背腔宽度 b 的取值进行仿真计算,仿真结果汇总如图 3 和图 4 所示。

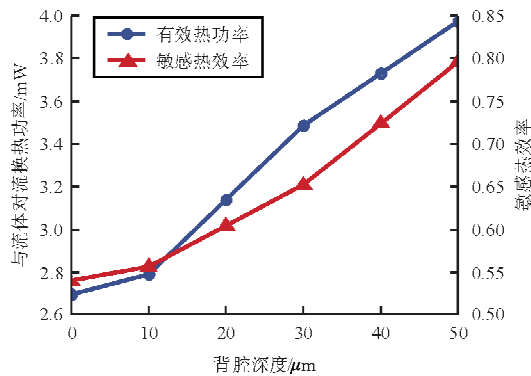


图 3 背腔深度 h 对传感器敏感热效率的影响
Fig. 3 Relationship between cavity depth and sensing efficiency

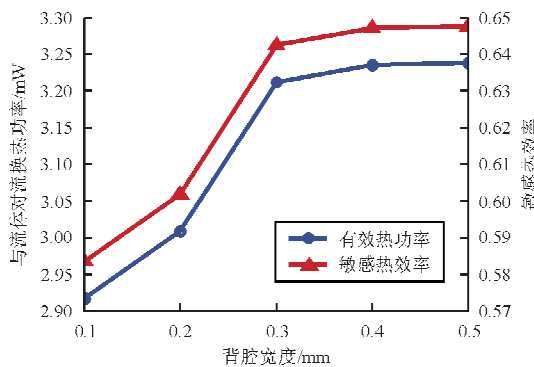


图 4 背腔宽度 b 对传感器敏感热效率的影响
Fig. 4 Relationship between cavity width and sensing efficiency

从图 3 和图 4 可以看出,随着背腔深度的增加,传感器的敏感热效率呈上升趋势,在热敏元件完全悬空状态下传感器的敏感热效率最高;随着隔热背腔宽度的增大,在 $0 \sim 0.3 \text{ mm}$ 范围内传感器的敏感热效率呈快速上升趋势,当背腔宽度大于 0.3 mm 后,敏感热效率上升趋势变缓。

1.2 器件动态性能分析

动态性能描述热膜探头对快速变化的流体参

数(流速、壁面剪应力、温度等)的感测能力。衡量热膜探头动态性能的主要参数是时间常数 τ ,时间常数越小,传感器的动态响应越快。时间常数主要取决于衬底材料的热容量和热导率。热容量反映热惯性大小,与质量、比热紧密相关,衬底热容量增大导致时间常数增大;衬底热导率增大也会使时间常数增大^[7],使得动态响应变慢。

在传感器衬底上的隔热背腔结构相当于采用静态空气代替同体积的聚酰亚胺衬底材料。聚酰亚胺与静态空气物理性质参数对比如表 1 所示。

表 1 聚酰亚胺与静态空气物理性质参数对比

Table 1 Physical parameters of polyimide and static air

材 料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
PI	1 420	1 090	0.120 0
空气	1.205	1 005	0.025 9

从表 1 可以看出,在比热相当的情况下,同体积的空气质量(密度)远小于聚酰亚胺,所以采用隔热背腔传感器本身的热容量大幅度减小;而且和聚酰亚胺相比,静态空气的热导率更小,使得向基底传热能力进一步减弱。因此,隔热背腔可以有效削弱由热敏元件向聚酰亚胺衬底的热量扩散,提高响应速度,并且在一定范围内,背腔的体积越大,时间常数越小。

此外,确定背腔尺寸还需要考虑柔性衬底在非平面测量应用时变形强度的问题。结合仿真分析结果与实际应用需求,确定出背腔尺寸为单折背腔宽度为 $0.3 \text{ mm} \times$ 回形热敏元件折数(5 折) = 1.5 mm ,深度为 $25 \mu\text{m}$ 。

2 微加工工艺

目前,国内外尚无此类结构及其现成的加工工艺,因此研发了专门针对此类新型敏感探头的微加工工艺,主要包括正面热敏元件及导线的制作、背腔结构的制作等。前者采用基于溅射-光刻-剥离等工艺的图形转移工艺^[8],在此基础上,必须考虑在保护正面已有敏感结构的情况下,如何完成隔热背腔的加工。本文建立了针对隔热背腔式柔性热膜探头的双面图形化微加工工艺,工艺流程如图 5 所示。

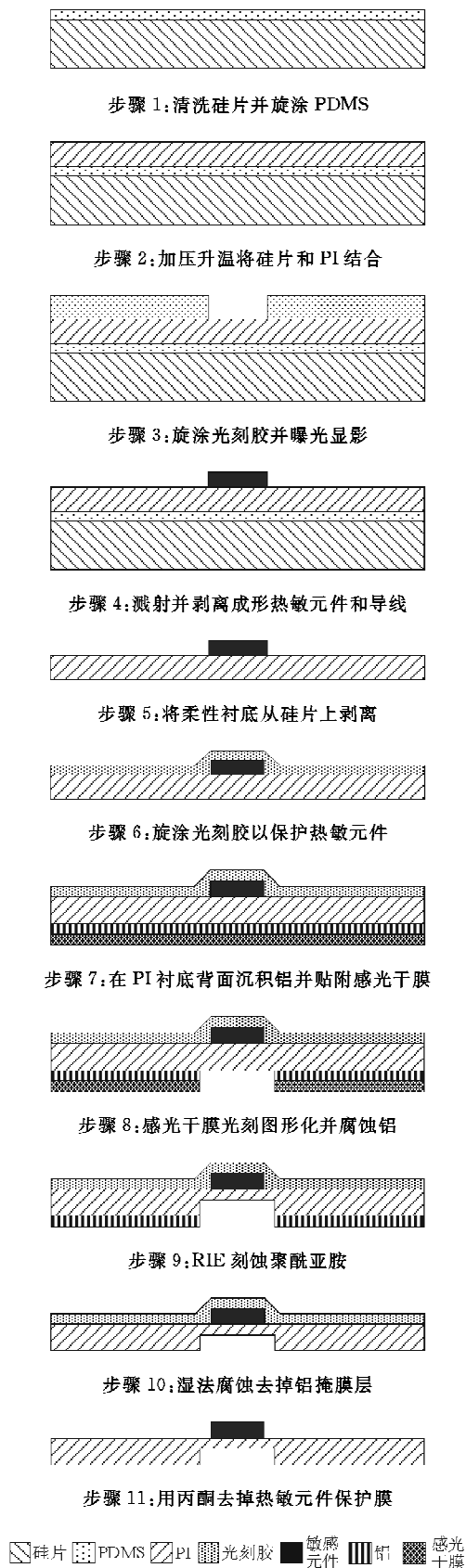


图 5 传感器微加工工艺流程图

Fig. 5 Flow diagram of micromachining processes

聚酰亚胺衬底上正面热敏元件和导线的微成型工艺涉及聚酰亚胺柔性衬底与硬质载体的固定、热敏元件和导线金属薄膜的沉积—图形化工艺、柔性热膜器件从工艺载体上剥离等。工艺方案如图 5 所示:步骤 1~2 用硅片作为柔性衬底的硬质载体,通过临时粘附剂 PDMS 实现聚酰亚胺柔性衬底在硬质载体上的平整贴附;步骤 3 旋涂光刻胶,经过曝光、显影形成热敏元件和导线的图形化掩膜;步骤 4 在聚酰亚胺衬底上溅射热敏镍膜和铜膜,通过剥离工艺图形化镍热敏元件和铜导线;步骤 5 在热板加热条件下用镊子从硅片载体上剥离柔性热膜。

隔热背腔的加工难点是要在保证正面热敏元件完好的情况下进行聚酰亚胺柔性衬底的选择性刻蚀加工。本文提出的聚酰亚胺衬底背腔是通过反应离子刻蚀(RIE)来实现的,采用直接沉积于衬底背面的图形化金属薄层作为刻蚀掩膜。由于此时衬底正面热敏元件已经成型,采用硬质载体整体贴附正面容易破坏敏感结构,并且在柔性聚酰亚胺衬底上的金属掩膜采用传统的光刻胶旋涂、曝光图形化的方法难以实现。因此,采用柔性感光干膜背面贴附曝光以及后续显影、湿法腐蚀工艺,可以获得满足要求的图形化金属掩膜。此外,背腔成型工艺中还涉及到背面套刻对准问题,由于传感器的柔性以及热敏元件的易损性,不像硅片那样能够直接真空吸附于曝光机的底座托盘上,需要采用透光玻璃薄片作为载体来实现背面的套刻对准。

背腔加工工艺(接正面热敏元件图形化工艺)包括:步骤 6 在热敏元件一侧全部旋涂光刻胶保护正面热敏元件;步骤 7 在聚酰亚胺衬底背面上沉积铝薄膜,在铝膜上贴附感光干膜(与正面保护光刻胶极性相反);步骤 8 将正面基底铺展边缘固定在透光玻璃薄片上,底面对准并对感光干膜光刻,借助图形化的干膜对铝金属层进行湿法腐蚀,形成后面用于背腔刻蚀的金属掩膜;步骤 9 RIE 刻蚀聚酰亚胺形成背腔;步骤 10 刻蚀完成后湿法腐蚀去除铝掩膜;步骤 11 采用丙酮去掉用于保护正面热敏元件的光刻胶,传感器成型。

加工出的热膜探头器件扫描电镜照片如图 6 所示。其中,5 折回形热敏元件阻值为 40Ω ,线宽为 $50 \mu\text{m}$ 。

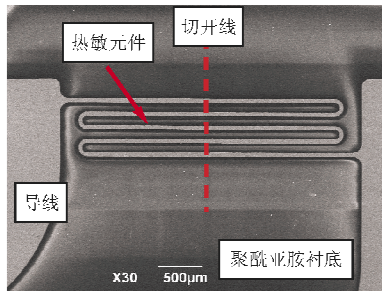


图 6 隔热背腔式热膜探头 SEM 照片

Fig. 6 SEM photo of flexible hot film sensor

为了观察背腔结构,将传感器探头沿图 6 所示的切开线进行物理剖切,得到的断面 SEM 照片如图 7 所示。

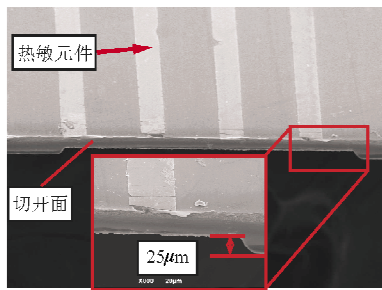


图 7 隔热背腔柔性热膜探头的断面 SEM 照片

Fig. 7 SEM section view of new sensor with Insulating Cavity Underneath

从图 7 可以看出,热敏元件位于隔热背腔的正上方,背腔深度为 $25\ \mu\text{m}$,聚酰亚胺衬底的厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 。背腔的加工可控性和聚酰亚胺刻蚀均匀性都很好,聚酰亚胺刻蚀后腔底表面粗糙度为 $350\ \text{nm}$,如图 8 所示。

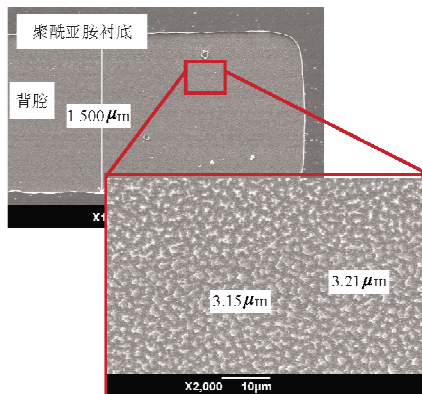


图 8 聚酰亚胺衬底背腔结构及形貌图

Fig. 8 Structure and morphology of cavity in polyimide substrate

3 传感器性能测试

在风洞提供的稳定气流环境下,测试柔性热膜

探头的静/动态性能,并将有隔热背腔结构的探头和无背腔结构的探头分别安装于平板上进行对比。为了捕捉快速变化的动态信号,采用高速示波器和高速数字万用表进行数据采集。

为传感器提供 $40\ \text{mA}$ 的激励电流,通过阶梯升速实现风洞风速从 $0\sim 10\ \text{m/s}$ 变化,得到有、无隔热背腔的两种结构传感器的敏感电压信号输出如图 9 所示。

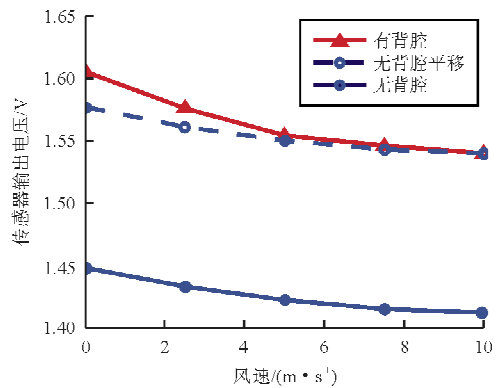


图 9 两种结构探头的敏感输出信号对比

Fig. 9 Comparison of sensors static output signal between with and without cavity

从图 9 可以看出,在相同输入情况下,有隔热背腔探头的电压输出信号幅度比无背腔结构的高 20% 左右;将无隔热背腔探头数据曲线向上平移,使其末端端点与隔热背腔式探头末端端点重合,可以看出有隔热背腔探头的灵敏度(曲线斜率)明显高于无隔热背腔探头。

动态响应测试采用 $10\ \text{m/s}$ 恒定风速环境,给探头施加 $10\ \text{mA}$ 激励电流阶跃信号,测得的两种探头的阶跃动态响应如图 10 所示。

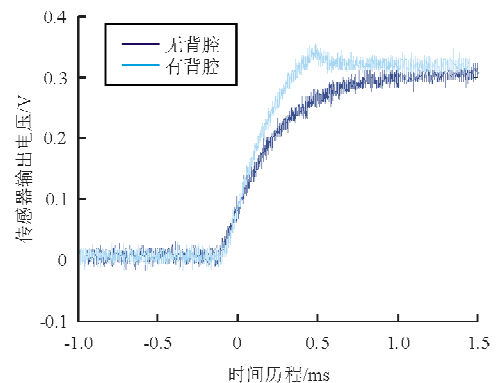


图 10 两种结构探头的动态阶跃响应对比

Fig. 10 Comparison of sensors dynamic stepping response between with and without cavity

从图 10 可以看出,衬底隔热背腔结构时间常数明显减小,从 $400 \mu\text{s}$ 降为 $220 \mu\text{s}$ 。

4 结 论

(1) 设计了隔热背腔式柔性热膜探头新结构,研究并建立了针对隔热背腔式柔性热膜探头的双面图形化微加工工艺,采用该工艺获得了图形化精度较高的隔热背腔式敏感探头器件。

(2) 通过静/动态性能对比测试,表明隔热背腔式柔性热膜探头的信号输出量值、灵敏度、动态响应速度都获得了明显提升,与数值仿真和理论分析结果相吻合。

参考文献

- [1] 马炳和, 赵建国, 邓进军, 等. 全柔性热膜微传感器阵列制造工艺及性能优化[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1971-1977.
Ma Binghe, Zhao Jianguo, Deng Jinjun, et al. Fabrication of flexible hot film sensor array and its optimization[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1971-1977. (in Chinese)
- [2] Schmid U, Ababneh A, Seidel H, et al. Characterization of aluminium nitride and aluminium oxide thin films sputter-deposited on organic substrates[J]. Microsystem Technologies, 2008, 14(4): 483-490.
- [3] Zhiyong Tan, Mitsuhiro Shikida, Masafumi Hirota, et al. Characteristics of on-wall in-tube flexible thermal flow sensor under radially asymmetric flow condition[J]. Sensors and Actuators, 2007, 138(1): 87-96.
- [4] Ulrich Buder, Andreas Berns, Jan von Klitzing, et al. Family of micromachined wall hot-wire sensors on polyimide foil[J]. AIAA Journal, 2007, 45(8): 1798-1809.
- [5] Mark Sheplak, Louis Cattafesta, Toshi Nishida, et al. MEMS shear stress sensors: promise and progress[R]. AIAA-2004-2606, Portland; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [6] Jianghui Chao, Wei Shyy, Siddharth S Thakur, et al. Effect of conjugate heat transfer on MEMS-based thermal shear stress sensor[J]. Numerical Heat Transfer, 2005, 48(3): 197-217.
- [7] 马炳和, 周保清, 邓进军, 等. MEMS 微型热敏传感器的隔热结构及其性能分析[J]. 传感技术学报, 2008, 21(6): 933-937.
Ma Binghe, Zhou Baoqing, Deng Jinjun, et al. On heat insulation of micro thermal sensor using FEA[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(6): 933-937. (in Chinese)
- [8] 马炳和, 傅博, 李建强, 等. 溅射-电镀微成型制造柔性热膜传感器阵列[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2147-2152.
Ma Binghe, Fu Bo, Li Jianqiang, et al. Flexible hot-film sensor array fabricated with sputtering electroplating micromachining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(11): 2147-2152. (in Chinese)

作者简介:

马炳和(1972—),男,教授,博导。主要研究方向:航空应用微系统、MEMS 设计。

郝日鹏(1986—),男,硕士研究生。主要研究方向:柔性 MEMS 器件的设计和加工。

邓进军(1978—),男,副教授。主要研究方向:微机电系统技术。

朱鹏飞(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:微加工工艺和测试技术。

(编辑:马文静)