

文章编号 1004-924X(2009)08-1971-07

全柔性热膜微传感器阵列制造工艺及性能优化

马炳和,赵建国,邓进军,苑伟政

(西北工业大学 陕西省微/纳米系统重点实验室,陕西 西安 710072)

摘要:为了测量飞机、流体管腔等气动面上的温度、剪应力等流场参数分布,以镍作为热敏材料,利用 MEMS 微加工技术在聚酰亚胺衬底上制作出了一种全柔性的热膜微传感器阵列。该传感器阵列的整体厚度薄(100 μm 以内)、软性可弯,可以紧贴曲型壁面从边界层底部实现非破坏性的动态流场参数测量。设计了器件阵列结构,研发了基于溅射成型与退火热处理的微加工工艺。结合工艺与测试实验,系统地分析了氩气压强、衬底温度、溅射功率、退火温度等工艺参数对电阻温度系数的影响规律。为了获得更高的器件灵敏度,通过优化工艺参数提高了柔性热膜微传感器的电阻温度系数,使其达到了 $4.64 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$,并且保持了好的线性度。

关键词:镍;柔性热膜传感器阵列;电阻温度系数;微加工

中图分类号:TP212.11 **文献标识码:**A

Fabrication of flexible hot film sensor array and its optimization

MA Bing-he, ZHAO Jian-guo, DENG Jin-jun, YUAN Wei-zheng

(*Micro and Nano Electromechanical System Laboratory,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

Abstract: To measure the flow field distribution parameters on the aerodynamic surfaces of airplanes and flow pipes, a hot film sensor array with the sensing material of nickel is fabricated on a polyimide substrate by the MEMS technology. The flexible and thin (whole thickness less than 100 μm) sensor array can be attached upon a curved surface (such as airfoil) to measure the temperature distribution or flow parameters in a minimal invasion rapidly. The structure of sensor array is designed and the fabrication techniques are presented based on the magnetron sputtering and heat annealing. Then, the influences of the argon pressure, substrate temperature, sputtering power, and the annealing temperature on the temperature coefficient of resistance (TCR) for the sensor is studied. Finally, a high TCR of $4.64 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ with good linearity is obtained.

Key words: nickel; flexible hot film sensor array; temperature coefficient of resistance; microfabrication

收稿日期:2009-02-13;修订日期:2009-04-01.

基金项目:国家自然科学基金航空飞行器重大研究计划项目(No. 90305017);航空科学基金项目(No. 04I53074);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA04Z347)

1 引言

热膜微传感器具有高灵敏、高响应速度的特点,在飞机、流体的管腔等气动面上的温度、速度、流量、剪应力等流动参量的高精度、高动态测量方面具有重要应用价值。阵列化的热膜微传感器可以实现流场的分布式测量,有利于边界层结构、湍流等空气动力学问题的深入研究,提高风洞试验测试、飞行试验测试水平,并可为主动流动控制等提供器件支持,因此已经成为国际研究热点^[1-9]。美国的加州理工大学、加州大学洛杉矶分校共同研发了用于飞机机翼上的边界层分离检测的热膜微传感器阵列,该传感器阵列以多晶硅为热敏材料,制作了多个分立的刚性热敏单元,并使用聚酰亚胺将多个热敏单元连接形成阵列,从而使传感器阵列具有一定柔性,使热敏传感器阵列用于弯曲壁面流动参量的分布式测量成为可能,但是该器件柔性有限,制造工艺复杂,鲁棒性不高^[1]。全柔性衬底的热膜微传感器阵列可以解决上述缺陷。此类传感器阵列将热敏单元直接制作在柔性衬底上,增加传感器阵列的柔性、简化了制作工艺。基于全柔性衬底的热膜微传感器阵列拥有重要发展潜力和广阔应用前景,德国萨尔大学、国内西北工业大学、上海微系统所等都对全柔性的热膜微传感器阵列技术开展了研究^[4-9]。

电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR)是柔性热膜微传感器阵列的关键性能参数,直接影响器件的灵敏度。热敏材料的种类和制作工艺决定了器件最终的 TCR,本文选取了合适的热敏材料,并且首次系统性地从氩气压强、衬底温度、溅射功率、热处理温度等角度研究了几个重要微加工工艺参数对期间 TCR 的影响规律,获得了高 TCR 的全柔性镍基热膜微传感器阵列,具有高灵敏度、快热响应速度、柔软可弯、可曲面贴附实现分布测量等优点。

2 热敏材料的选择及器件制造工艺

2.1 热敏材料的选择

利用 MEMS 微加工技术可以实现热敏传感器的微型化和阵列化,但是截至目前在柔性衬底上制作的微型热膜传感器的电阻温度系数普遍不

高,大多处于 $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.9 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ^[1,9]。限制 TCR 提高的几个主要原因有:(1)热膜微传感器阵列的敏感单元在结构上多为热敏薄膜形式,沉积制备的热敏薄膜须经热处理才能达到好的热敏性能,但是有机柔性衬底材料会限制最高退火温度,使得热处理不充分,从而热敏薄膜的 TCR 远低于块材;(2)以往经常采用铂作为热敏材料,即使块材铂的 TCR 也仅为 $3.85 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$;(3)对于柔性衬底上热敏电阻 TCR 的影响因素及影响规律缺乏系统性研究。

由于镍的 TCR 明显高于铂,块材镍可高达 $6.75 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$,并且镍的熔点相对较低,使所沉积的镍薄膜有望在较低温度下实现有效退火。因此,采用镍膜为热敏材料,以聚酰亚胺(PI)作为有机柔性衬底,研发了全柔性热膜微传感器阵列。

2.2 器件结构及制造工艺

镍薄膜热敏电阻是传感器阵列的敏感元件,直接沉积在聚酰亚胺柔性衬底上,两端与衬底上的铜焊盘连接,进一步通过铜导线实现电连接。研发的柔性热膜传感器阵列结构如图 1 所示。聚酰亚胺衬底以及焊盘、导线、热敏电阻等均为柔性薄膜,总厚度在 $100 \mu\text{m}$ 以内,整体柔性连续可弯,有利于实现各种曲型表面贴附的阵列化分布测量任务,并对被测表面不会造成大的干扰。另外,聚酰亚胺柔性衬底的热绝缘性也有利于获得高的灵敏度和热响应速度^[3]。

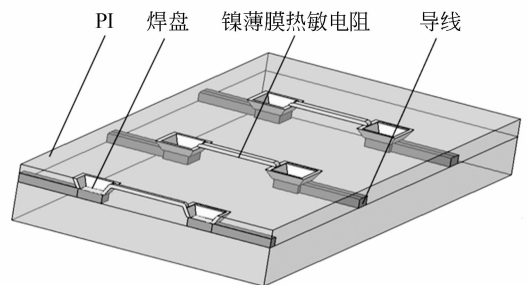


图 1 柔性热膜传感器阵列结构示意图

Fig.1 Schematic of flexible hot-film sensor array

器件的加工工艺主要涉及柔性衬底及其焊盘、导线的制作,镍薄膜热敏电阻的沉积成型和退火热处理。前者主要是在敷铜的聚酰亚胺膜(如 Kapton 膜)上通过光刻、刻蚀实现铜焊盘和导线制作。镍薄膜热敏电阻的沉积成型和热处理是关

键工艺,主要过程如下:(1)对于柔性衬底表面进行清洁处理;(2)通过光刻、刻蚀技术制作出镍薄膜热敏电阻的沉积掩模;(3)采用射频磁控溅射仪溅射沉积热敏镍薄膜,同时借助掩模的遮蔽、剥离、刻蚀等工艺实现镍薄膜热敏电阻成型;(4)在真空环境或者保护气下进行退火处理,减小镍薄膜热敏电阻中的缺陷浓度,提高并稳定其热敏性能。

所研发的镍基柔性热膜微传感器阵列如图 2 所示。

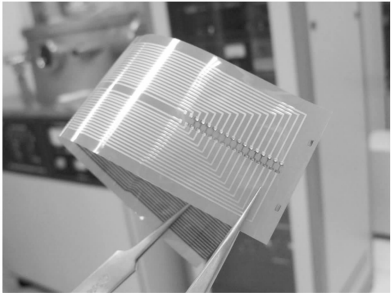


图 2 全柔性热膜微传感器阵列实物图

Fig. 2 Photo of flexible hot-film sensor array

3 制造工艺参数对 TCR 的影响规律研究

热敏元件的 TCR 是最重要性能参数之一,直接影响器件的灵敏度。相对于原子排列更加平衡的块材金属而言,热敏薄膜的 TCR 受到热敏薄膜中缺陷浓度的严重影响^[10]。热敏薄膜中的缺陷分布于表面、晶界、晶粒内部。宏观来看,增加薄膜厚度、减少晶界、降低薄膜内应力、减少薄膜的杂质含量等都有利于减少缺陷。从镍基热敏薄膜的溅射沉积和退火工艺过程来看,当薄膜厚度足够大时(以下实验研究的镍薄膜厚度均为 $1 \mu\text{m}$),薄膜的缺陷浓度对氩气压强、衬底温度、溅射功率、退火温度等工艺参数很敏感。分析各种因素对薄膜缺陷浓度的影响规律,有利于提高热敏薄膜 TCR 及其器件灵敏度。

3.1 氩气压强的影响

氩气压强主要影响热敏薄膜的本征应力^[11]。射频溅射沉积热敏薄膜过程如下:氩离子加速轰击到靶材上使得热敏材料粒子被溅射出去,以一

定动能沉积到柔性衬底上形成薄膜。在热敏材料粒子飞向衬底途中会与氩气分子发生碰撞,使热敏材料粒子动能减小。高的氩气压强会增加碰撞频率,实际到达衬底表面的热敏粒子动能变小,对已沉积薄膜的轰击挤压作用(造成压应力)不足而薄膜生长结晶收缩趋势占优,最终薄膜趋于张应力状态。反之,低气压沉积会降低热敏材料粒子与氩气分子的碰撞概率,热敏材料粒子仍可保持较大动能对已沉积薄膜造成强的轰击挤压,使薄膜趋于压应力状态。

实验发现,在高溅射气压下整体溅射了镍薄膜的柔性衬底向下弯曲,表明薄膜呈张应力状态,在低溅射气压下溅射了镍薄膜的柔性衬底向上弯曲,表明薄膜呈压应力状态,如图 3、4 所示。

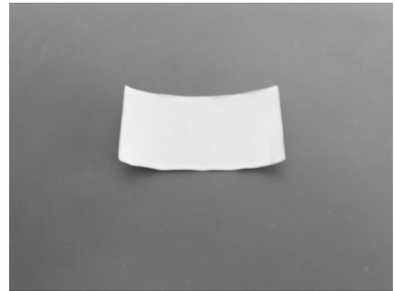


图 3 高压气溅射时的张应力弯曲

Fig. 3 Warp of substrate sputtered at high Ar pressure

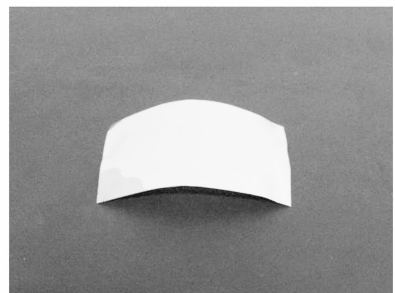


图 4 低气压溅射时压应力翘曲

Fig. 4 Warp of substrate sputtered at low Ar pressure

无论压应力还是张应力都会使热敏薄膜的晶格产生缺陷,使 TCR 减小。实验发现,当氩气气压从 0.1 Pa 增大到 3.0 Pa 的过程中,镍薄膜从压应力转变为张应力状态, 1.0 Pa 左右为内应力极性转变点,如图 5 所示。因此,可以调整氩气气压处于应力极性转变点附近以尽量减小应力提高 TCR。

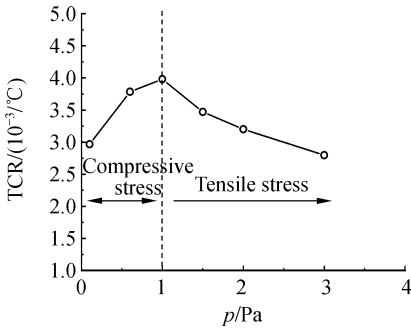


图 5 TCR 与氩气压强的关系

Fig. 5 Relationship between Ar pressure and TCR

3.2 衬底温度的影响

提高衬底温度可以加速热敏薄膜内部的原子迁移,尤其是薄膜缺陷处的原子迁移,使原子排列趋于平衡^[12]。因此,适当提高衬底温度有利于减少缺陷,增大 TCR。然而,过多提高衬底温度也会增大薄膜内部的热应力,使缺陷浓度反而增大、TCR 下降。实验发现,随着柔性衬底温度升高,镍薄膜的 TCR 增大,但是当温度超过 200 °C 时,热应力影响变得更显著,TCR 开始下降,如图 6 所示。所以,为了提高镍薄膜的 TCR,应提高衬底温度,但是也不宜过高。

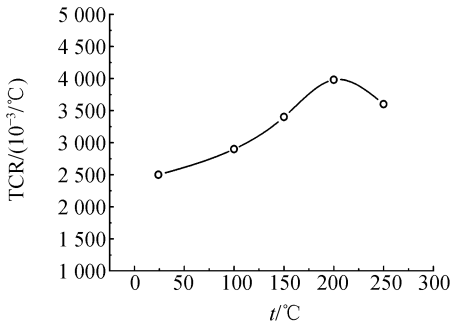


图 6 TCR 与衬底温度的关系

Fig. 6 Relationship between substrate temperature and TCR

3.3 溅射功率的影响

在溅射气压一定的情况下,射频磁控溅射功率决定薄膜沉积的速率。沉积速率强烈影响薄膜组织结构。当热敏材料以小功率缓慢沉积到薄膜表面后,有充足的粒子迁移时间,能够与已沉积的薄膜表面充分融合、结晶,组织结构致密。然而,在大功率快速沉积时,热敏材料粒子仅能简单无序堆积,薄膜组织结构疏松。溅射功率越大,沉积

速率越快,组织就越疏松,如图 7、8 所示。

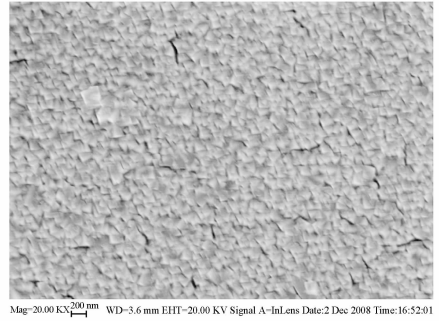


图 7 200 W 溅射功率下形成的镍薄膜结构
Fig. 7 Nickel film sputtered at lower power

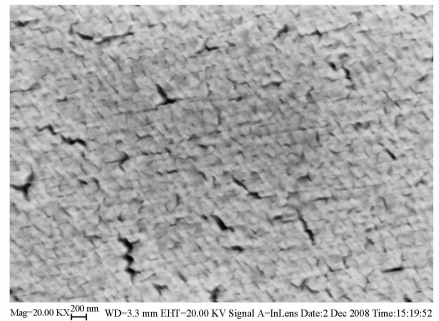


图 8 400 W 溅射功率下形成的镍薄膜组织结构显著疏松
Fig. 8 Nickel film with loose construction sputtered at higher power

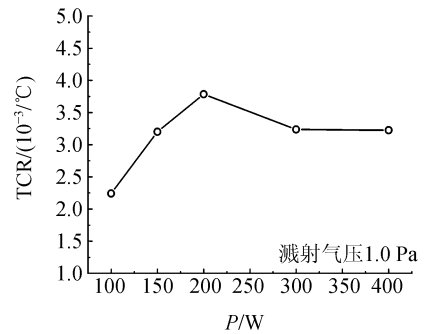


图 9 TCR 与溅射功率的关系

Fig. 9 Relationship between sputtering power and TCR

疏松的组织结构会使热敏薄膜的 TCR 显著下降。所以,为了提高 TCR 应减小溅射功率。实验发现,当射频溅射功率从 400 W 减小到 200 W 时,TCR 增大,如图 9 所示。但是,也不能过分减小溅射功率。实验发现,当溅射功率小于

200 W时,随着功率继续减小,镍薄膜 TCR 反而减小,原因是小功率下的低速率沉积会增加相同厚度薄膜的沉积时间,在沉积过程中薄膜表面与氩气的接触时间延长,导致薄膜中氩含量增大,使得薄膜中的杂质引起的缺陷增多,TCR 反而会下降。

因此,为了提高镍薄膜的 TCR,应恰当选择比较小的溅射功率,但也不宜过小。

3.3 退火温度的影响

退火热处理会使溅射沉积的镍薄膜的晶粒均匀长大,使晶界总数减少,薄膜缺陷随之减少^[13]。因此,也可以提高镍薄膜的 TCR。实验发现,当退火温度从 200 °C 增加到 380 °C 时,晶粒显著增大,晶界迅速减小,如图 10、11 所示。

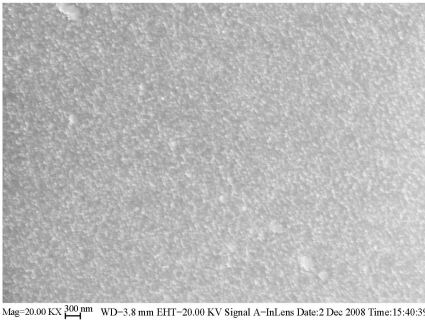


图 10 退火温度为 200 °C 时的薄膜表面微观形貌
Fig. 10 Micro-topography of nickel film surface annealed at 200 °C

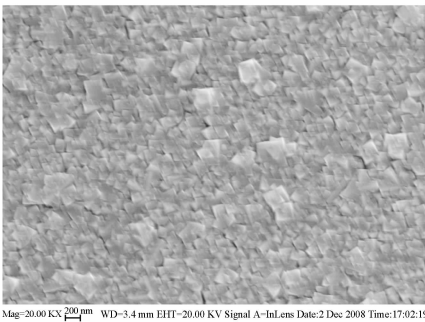


图 11 退火温度为 380 °C 时的薄膜表面微观形貌
Fig. 11 Micro-topography of nickel film surface annealed at 380 °C

因此,应尽量提高退火温度以增大 TCR,如图 12 所示。镍的再结晶温度约为 370 °C,高于该温度进行退火会更有效。但是,最高退火温度受

柔性衬底材料温度耐受性的限制。

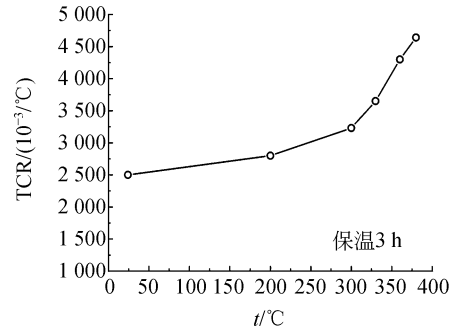


图 12 TCR 与退火温度的关系
Fig. 12 Relationship between annealing temperature and TCR

4 工艺参数优化结果

依据上述实验研究结果,通过优化选择射频磁控溅射仪氩气压强、溅射功率、衬底温度、溅射功率等工艺参数,在 380 °C 退火保温 3 h,使镍薄膜 TCR 达到 $4.64 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$,并且在较大温度范围内保持了较好线性度。所研发器件的方块电阻随温度变化情况如图 13 所示。

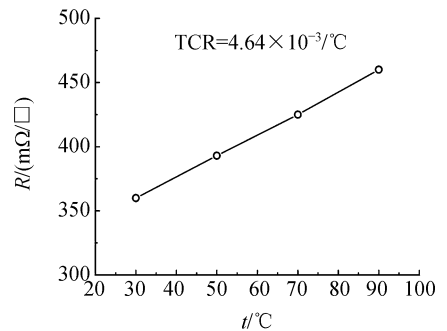


图 13 柔性热膜传感器阵列方块电阻与温度的关系
Fig. 13 Sheet resistance of nickel film versus temperature

5 结 论

本文利用 MEMS 微加工技术在聚酰亚胺衬底上制作出了镍基全柔性热膜微传感器阵列,具

有全柔可弯、高灵敏度的优点,可以广泛应用于飞机翼面等曲型表面的温度、近壁流场及剪应力等分布测量任务。结合工艺和测试实验,系统性地研究掌握了射频磁控溅射沉积和热处理工艺参数对镍薄膜 TCR 的影响规律。明确了提高镍基柔性热膜微传感器阵列 TCR 的工艺优化方向:选

择适当的氩气气压,使其保持在应力极性转变点附近,选择适当小的溅射功率,适当提高衬底温度和退火温度。最终研制了较高 TCR 的柔性微型热敏薄膜电阻,其 TCR 达到 $4.64 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。本文的研究,对于研发高灵敏度的镍基及其他热敏薄膜材料的全柔性热敏微传感器有重要意义。

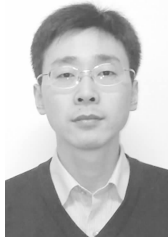
参考文献:

- [1] HUANG J B, JIANG F K, TAI Y C. A micro-electro-mechanical-system-based thermal shear-stress sensor with self-frequency compensation[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1999,10(8):687-696.
- [2] HAUSMANN F, SCHRODER W. Coated hot-film sensors for transition detection in cruise flight[J]. *Journal of Aircraft*, 2006,43(2):456-465.
- [3] BERNS A, OBERMEIER E, WANG X H, *et al.*. AeroMEMS sensor with integrated pressure and hot-wire sensor for high-frequency transition detection[C]. *47th AIAA Aerospace Sciences Meetings and Exhibit, Reston: AIAA*, 2009:318-425.
- [4] NGO L, KUPKE K, SEIDEL H, *et al.*. Simulation and experimental results of a hot-film anemometer array on a flexible substrate[C]. *Proceedings of CANEUS 2006, Reston: AIAA*, 2004: 6726-6729.
- [5] SCHMID U, ABABNEH A, SEIDEL H, *et al.*. Characterization of aluminum nitride and aluminum oxide thin films sputter-deposited on organic substrates[J]. *Microsyst Technol*, 2008, 14(4-5):483-490.
- [6] 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 B H, ZHOU B Q, DENG J J, *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)
- [7] XU Y, JIANG F K, SCOTT N, *et al.*. Flexible shear-stress sensor skin and its application to unmanned aerial vehicles[J]. *Sensors and Actuators*, 2003,105(3):321-329.
- [8] 肖素艳,车录锋,李昕欣,等. 基于柔性 MEMS 皮肤技术温度传感器阵列的研究[J]. *光学精密工程*, 2005,13(6):674-680.
XIAO S Y, CHE L F, LI X X, *et al.*. A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):674-680. (in Chinese)
- [9] XIAO S Y, CHE L F, LI X X, *et al.*. A cost-effective flexible MEMS technique for temperature sensing[J]. *Microelectronics Journal*, 2007,38(3): 360-364.
- [10] 田民波. 薄膜技术与薄膜材料[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
TIAN M B. *Thin Film Technology and Material* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [11] HOFFMAN D W. Perspective on stress in magnetron thin films[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1994,12(4):953-961.
- [12] THORNTON J A, HOFFMAN D W. Stress-related effects in thin films[J]. *Thin Solid Films*, 1989,171(5):5-31.
- [13] MAYADAS A F, SHATZKES M. Electrical-resistivity model for polycrystalline film; the case of arbitrary reflection at external surfaces[J]. *Physical Review*, 1970,B1(4):1382-1389.

作者简介:



马炳和(1972—),男,河北辛集人,副教授,西北工业大学微系统工程系主任。主要研究方向为航空应用微系统、MEMS设计与建模。作为国家公派访问学者,曾在德国从事为期一年的欧盟纳米科技第5框架计划项目研究。E-mail:mabh@nwpu.edu.cn



邓进军(1978—),男,江西九江人,西北工业大学陕西省微/纳米重点实验室讲师,主要从事 MEMS 传感器与致动器方面的研究。E-mail:dengjj@nwpu.edu.cn



赵建国(1982—),男,陕西渭南人,西北工业大学在读硕士,主要研究方向为 MEMS 柔性热敏传感器。E-mail:zjg06032@gmail.com



苑伟政(1961—),男,山东掖县人,长江学者特聘教授,西北工业大学陕西省微/纳米重点实验室主任。从事 MEMS/NEMS 研究。E-mail:yuanwz@nwpu.edu.cn

● 下期预告

静电陀螺仪长球形空心转子的径向变形设计

孙新民,陶丽芝

(河北理工大学机械工程学院,河北唐山 063009)

为改善静电陀螺仪球形空心转子的动态圆度,将转子静态时设计成两极长、赤道短的长球形,以补偿由离心载荷引起的两极向内收缩、赤道向外膨胀产生的圆度误差。首先,根据弹性力学薄壳理论的载荷弹性变形计算公式,应用小变形独立作用与合成原理,构建了静电陀螺仪空心转子表面径向载荷的径向变形与离心载荷的径向变形的迭加计算公式。然后,按径向变形迭加计算公式构造了两极长、赤道短的长球形空心转子。最后,以示例对两极长、赤道短的长球形空心转子的设计、加工、测量进行了说明。实验结果表明:该加工后的长球形空心转子的极点半径比赤道半径长 $0.52 \mu\text{m}$,与设计值 $0.54 \mu\text{m}$ 相吻合。