

## Research on Temperature Coefficient of Resistance of MEMS-Based Pt Thin Film Temperature Sensor\*

HOU Xiaowei<sup>1</sup>, LIU Lina<sup>2\*</sup>, LÜ Yang<sup>1</sup>, ZHENG Lianguang<sup>1</sup>, ZHANG Congchun<sup>3</sup>

(1. CRRC Transducer Measurement Technology R&D Center, Ningbo CRRC Times Transducer Technology CO., LTD., Ningbo 315021, China; 2. Hunan Automotive Engineering Vocational College, Zhuzhou 412001, China; 3. National Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology, Research Institute of Micro/Nano Science and Technology, Key Laboratory for Thin Film and Microfabrication Technology of the Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Pt-based thin film temperature sensor was fabricated on silicon substrate by MEMS processes. The Pt thin film samples were annealed in four different temperature points, 500 °C, 600 °C, 700 °C and 800 °C. The resistance of both unannealed samples and annealed samples were measured and compared. The resistance-temperature performance for samples annealed at 800 °C was tested, the temperature coefficient of resistance (TCR) at 0 °C was  $3.150 \times 10^{-6} / \text{K}$ . The measurement for resistance-temperature characteristic of both heating curves and cooling curves was carried out for many times, the heating curves and cooling curves are essentially coincident with each other. The results show that the heat treatment can obviously improve stability and repeatability of the Pt thin film temperature sensor.

**Key words:** platinum resistance; temperature sensor; MEMS; heat treatment; temperature coefficient of resistance

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.06.007

## MEMS 铂薄膜温度传感器的电阻温度系数研究\*

侯晓伟<sup>1</sup>, 刘莉娜<sup>2\*</sup>, 吕阳<sup>1</sup>, 郑良广<sup>1</sup>, 张丛春<sup>3</sup>

(1. 宁波中车时代传感技术有限公司, 中国中车传感测量技术研发中心, 浙江 宁波 315021; 2. 湖南汽车工程职业学院车辆工程学院, 湖南 株洲 412000; 3. 上海交通大学微纳科学技术研究院薄膜与微细加工技术教育部重点实验室 微米/纳米加工技术国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 采用 MEMS 工艺在硅衬底上制备了铂电阻薄膜温度传感器, 在 500 °C、600 °C、700 °C 和 800 °C 四个温度点下对铂电阻样品进行了热处理, 对样品在退火前后的电阻值进行了测试和对比分析。对 800 °C 的退火样品的阻温特性进行了多次测量, 其在零摄氏度的电阻温度系数可达  $3.150 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。另外还对退火后的铂电阻样品阻温特性进行了多次升温降温测试, 其升温曲线和降温曲线基本重合, 表明退火处理可以明显的改善铂薄膜温度传感器的稳定性和重复性。

**关键词:** 铂电阻; 温度传感器; 微机电系统; 热处理; 电阻温度系数

中图分类号: TP212.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2020)06-0825-05

铂薄膜温度敏感器件是利用金属铂的电阻值大小与温度值成特定函数关系所制成的一种测温元件。与其他温度敏感器件相比, 铂薄膜温度敏感器件具有体积小、重量轻、测温范围广、精度高、线性度好、灵敏度高、热响应速度快、稳定性高、抗振性能好、耐高温高压、适宜恶劣环境等优点<sup>[1]</sup>, 除了广泛应用于电站、石油、化工、食品等行业的过程测量和控制外, 还应用于轨道交通、汽车工业、分析仪器仪表、供热通风等中高端工业市场<sup>[2]</sup>。

随着工业发展水平的不断提高, 越来越多的应

用场合对温度测量的精度提出了更高的要求, 比如生命科学、医疗器械、制药设备等场合。特别是需要高精度测量的高精密设备, 比如用来解决大尺寸工件以及微纳尺寸器件的超精密测量问题的激光干涉仪<sup>[3-4]</sup>, 需要采用温度传感器随时监测测量环境和被测件的温度变化, 防止温度变化对激光干涉仪的测量精度造成影响, 造成被测加工件误差偏大的严重后果<sup>[5]</sup>。由于激光干涉仪对温度的测量精度高达 0.01 °C, 考虑到适用性与经济性, 行业中多采用铂电阻温度传感器来进行环境温度检测与控制。然

项目来源: 国家重点研发计划项目(2016YFB1200401); 宁波市工业重大科技专项攻关项目(2017B10017)

收稿日期: 2020-04-05 修改日期: 2020-06-10

而,铂电阻的相对温度灵敏度非常低,其测温精度易受导线电阻、热电动势、电压测量误差等因素影响,造成测量精度普遍不高。

为了实现高精度的温度测量,采用铂电阻温度传感器的测温系统主要通过后端的硬件和软件进行精密校正和温度补偿<sup>[6]</sup>。在常用的高精密铂电阻测温系统中,受铂电阻固有缺陷的影响,测量精度易受导线电阻、接触电阻等附加电阻的影响,主要采用三线制<sup>[7]</sup>或四线制<sup>[8]</sup>方法来消除掉导线电阻等的影响。这样的设计会造成测量系统结构复杂,实现困难,而且成本高昂,终端客户难以承受价格压力。因此,最有效的方法还是从温度传感器器件本身出发,来解决其灵敏度不高的问题。增加铂电阻温度传感器灵敏度,可采用增加电阻温度系数 $\alpha$ 和提高温度为 $t_0$ 时热敏电阻的阻值 $R_0$ 这两种办法。但增大电阻器本身的电阻 $R_0$ ,将增加金属的耗量,不仅增加了成本,而且使薄膜面积过大,不利于使用。因此,对薄膜热阻传感器来讲提高灵敏度的唯一途径只能是提高电阻温度系数 $\alpha$ 的值。由于 $\alpha\rho=C$ ( $\rho$ 为电阻率, $C$ 为常数)。同种金属薄膜的电阻温度系数与金属电阻率的乘积为常数,即降低电阻率就能提高金属薄膜的电阻温度系数。而金属材料的电阻率与材料晶格点阵热振动和缺陷、杂质对自由电子的散射有关。而适当的热处理能够极大地减少铂薄膜材料内部的缺陷,从器件本身来提高铂电阻温度传感器的电阻温度系数,通过改善灵敏度从而提高测量精度。

本文利用 MEMS 工艺在硅衬底上制备了铂电阻薄膜温度传感器,通过不同的退火工艺,研究对比了不同退火温度下的铂电阻薄膜器件在不同温度下的电阻值及电阻温度系数,并对铂电阻薄膜器件的稳定性和重复性进行了研究。

## 1 铂电阻薄膜器件设计、制备及热处理

### 1.1 设计

对于铂薄膜不同的结构尺寸,如线宽及薄膜厚度,会对铂敏感单元的阻值产生很大的影响。薄膜电阻与长度 $L$ 成正比,与横截面积 $A$ 成反比,计算公式如式(1)所示:

$$R=\rho \frac{L}{A}=\rho \frac{L}{Wd}=\frac{\rho}{d} \frac{L}{W} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 表示薄膜电阻的电阻率, $L$ 表示电阻的总长度, $W$ 表示电阻的宽度, $d$ 表示电阻的厚度, $A$ 表示电阻的横截面积。

一般的电阻图形主要包括折线形和螺旋形两

种,由于螺旋形电阻的寄生效应强烈,因此将铂电阻敏感单元设计成折线形,加工工艺容易实现,且精度合理,可以测量基体表面小范围的温度场,如图 1 所示。

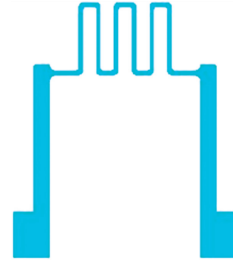


图 1 铂电阻薄膜温度传感器平面图

### 1.2 制备工艺

铂电阻薄膜温度传感器器件的制备工艺流程如图 2 所示,主要包括:①基片清洗,除去基片表面的其他杂质;②在基片表面旋涂一层光刻胶;③光刻显影。采用接触式曝光;④采用射频磁控溅射在硅衬底表面溅射一层 Ti 粘附层;⑤再采用射频磁控溅射溅射一层 Pt 薄膜,厚度为 300 nm;⑥溅射完成后将基片放在丙酮溶液中 10 min~15 min,通过 lift-off 的方式去除剩余的光刻胶,然后再用去离子水冲洗并烘干。最终制备出的铂电阻薄膜器件成品如图 3 所示。

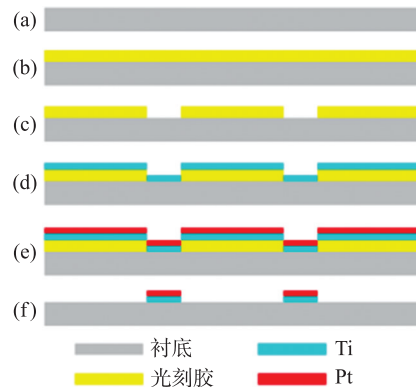


图 2 铂电阻薄膜器件制备工艺流程

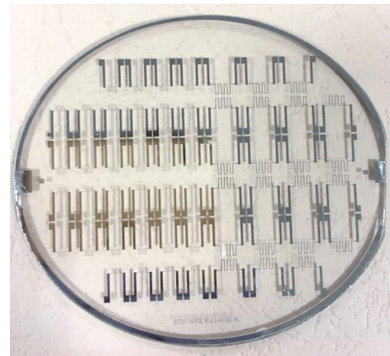


图 3 铂电阻薄膜器件成品图

### 1.3 热处理工艺

电阻是由于电子在材料中运动时,受周期性势

场畸变散射所致。根据马希森定则<sup>[9]</sup>,块状材料电阻率由以下几部分组成,如式(2)所示:

$$\rho = \rho_L + \rho_1 + \rho_i \quad (2)$$

式中: $\rho_L$  是晶格振动(声子)对电阻率的贡献,随着温度的增加而增加; $\rho_1$  为材料中的杂质散射对电阻率的贡献; $\rho_i$  是材料中的缺陷对电阻率的贡献; $\rho_1$ 、 $\rho_i$  与温度无关。

薄膜材料的电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR)如式(3)所示:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{\rho_L + \rho_1 + \rho_i} \frac{d\rho_L}{dT} \quad (3)$$

对某一材料而言, $d\rho_L/dT$  大致是确定的,因此为了增大 TCR,则应尽量减小  $\rho_1$  和  $\rho_i$ 。同时考虑表面散射和晶界散射的金属薄膜电导理论。对于膜状材料,它的膜上表面和衬底的下表面也会散射电子,从而对电阻率作出贡献。因为薄膜的厚度对电阻温度系数也有较大的影响,当薄膜厚度比金属材料的电子平均自由程大一个数量级左右时,表面散射引起的电阻率可以忽略,而金属材料的电子平均自由程一般在 10 nm~30 nm 之间,所以薄膜厚度应大于 300 nm。由式(4)得:

$$\alpha\rho = d\rho/dT = C \quad (4)$$

提高薄膜电阻的电阻温度系数,势必减小薄膜的电阻率。除减少  $\rho_1$  和  $\rho_i$ , 还须增加薄膜的厚度。为了提高薄膜电阻温度系数应采用高纯度靶材,膜厚不易薄,采用合理的工艺以最大限度降低薄膜中的缺陷和杂质。另外,根据晶粒晶界的二流体模型可知,适当热处理以增大晶粒尺寸,晶格缺陷密度减小,也可以提高 TCR。

根据相关文献<sup>[10]</sup>,薄膜电阻的制备往往是高温短时过程,因此大量的非平衡缺陷和一些介稳态结构被保留下来。在长期工作过程中,由于这些缺陷的逐渐消失和介稳态结构的逐渐转变,薄膜的性能逐渐发生变化。因此,为了提高薄膜电阻的稳定性,在制备完毕后,一般都采用高温退火处理。其目的是促使薄膜中的缺陷、非稳态结构、内应力等加速消失,让薄膜电阻处于稳定状态,提高薄膜的长期稳定性能。

退火的目的是要消除应力,把铂加热以加速晶格的恢复。因此,为了使铂电阻薄膜器件的性能更加稳定,对制备在硅衬底上的同一批制备的铂电阻薄膜样品,在马弗炉中进行退火,退火温度分别为 500 °C、600 °C、700 °C 和 800 °C,然后对退火前后的电阻进行对比分析。其中退火具体工艺如下:①在 50 min 内将马弗炉升温到 500 °C/600 °C/700 °C/

800 °C;②在对应的温度点下(500 °C/600 °C/700 °C/800 °C)保温 2 h;③随炉自然冷却。

### 3 实验测试及讨论

#### 3.1 不同温度退火处理后的电阻测试

由于制备的铂电阻器件结构紧凑,不方便测量,一般是将整个成品进行分割切片,形成独立的单个铂电阻器件,然后进行烧结银浆引线,如图 4 所示。对新制备的铂电阻薄膜温度传感器件,在常温下(25 °C)对其退火前后的电阻值进行了测试,如表 1 所示。

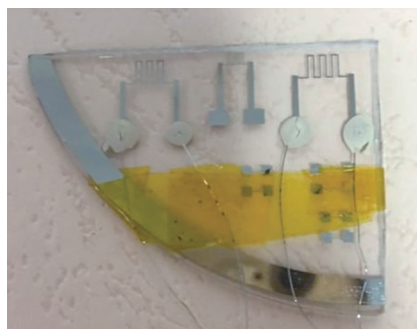


图 4 烧结引线后的铂电阻器件

表 1 铂电阻薄膜温度传感器件退火前后的电阻值

序号	退火温度/°C	退火前电阻/Ω	退火后电阻/Ω
1	500	141	189
2		145	228
3	600	141	382
4		142	380
5	700	141	297
6		141	350
7	800	156	139
8		157	140

从表 1 可以看出,铂电阻薄膜温度传感器件在 800 °C 以下进行退火处理后,其电阻总是增大的,不同批次退火处理的结果相同。此测试结果表明,对铂电阻薄膜温度传感器件进行一定温度下的退火处理,会导致电阻增大,这样的变化趋势对改善铂电阻薄膜温度传感器件的灵敏度是有益的。

对样品进行 500 °C 以上热处理,有两方面因素会影响电阻:一方面是铂电阻晶粒长大降低电阻,另一方面由于 Ti 向 Pt 层的扩散导致电阻增加,低于 800 °C 时,后者占主导。但是 800 °C 处理,晶粒明显长大,电阻又会减小。原因可能是薄膜内部晶体结构发生了改变,导致电阻减小。

为了验证这一推测,选取 400 °C、600 °C 和 800 °C 三个退火温度点下样品,利用扫描电镜对三者表

面进行扫描,得到的 SEM 图片如图 5 示。可以看出,400 °C 下样品颗粒非常微小且分布均匀,在 600 °C 下有明显的大颗粒出现,而在 800 °C 下出现了团状的结构,结构明显改变。铂电阻薄膜在沉积时内部有大量的结构缺陷,随着退火温度的升高,这些结构缺陷会逐渐消失,会导致铂电阻薄膜电阻率下降,这也可能是铂电阻薄膜温度传感器件电阻出现减小的原因<sup>[11]</sup>。从另一方面来讲,在较低的退火温度下,随着退火温度的增加,铂薄膜中的内应力会得到充分释放,铂薄膜由原来的介稳状态转变成相对稳定状态,使得电阻值增加,提高铂电阻性能;而在长时间的过高温状态,铂粒子会过度生长,彼此之间会出现互相挤压的状态,从而产生新的热应力,造成铂电阻性能降低<sup>[12-13]</sup>。

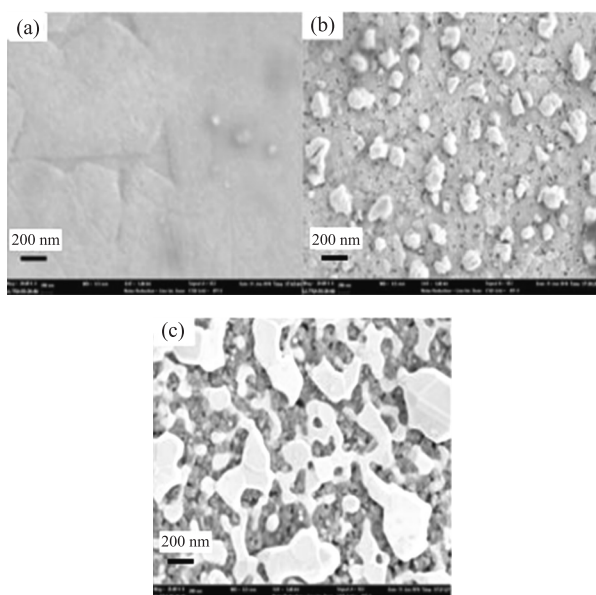


图 5 在 400 °C、600 °C 和 800 °C 三个退火温度点下样品的 SEM 图

### 3.2 电阻温度系数测试

具体测试方法是将制备好点完银浆的铂电阻薄膜温度传感器件放入恒温油槽中加热(测温范围为 25 °C 到 260 °C),引铂丝线出来用电子万用表测量其电阻随温度的变化。对 800 度退火样品进行反复多次测量,测量结果如图 6 所示。可以看出,铂电阻薄膜温度传感器同一次测量电阻的升温降温曲线基本重合,计算出 2 次循环的斜率和 TCR 进行比较。为了便于比较,将该样品在未退火时的数据一并列出(升温降温曲线图未给出),如表 2 所示。可以看出,样品在 800 °C 退火后,其 TCR 较未退火前有了明显的提高,达到约  $2\ 900 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。若取零摄氏度下的电阻为  $R_0$ ,则 TCR 可以达到  $3\ 150 \times 10^{-6}/\text{K}$  左右。

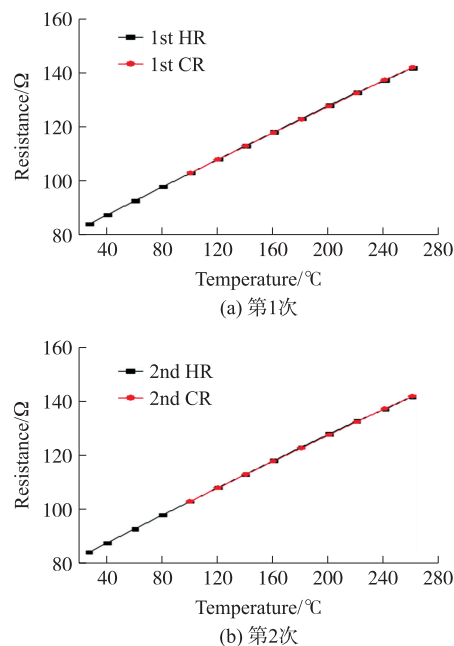


图 6 铂电阻的温度-电阻曲线  
(HR 代表升温,CR 代表降温)

表 2 样品在未退火和 800 °C 退火后的 TCR 单位:  $10^{-6}/\text{K}$

名称	次数	HR 斜率	CR 斜率	HR TCR	CR TCR
未退火	1	0.223 99	0.225 57	2 419	2 436
	2	0.227 88	0.226 87	2 461	2 450
800 °C 退火	1	0.248 23	0.243 58	2 955	2 900
	2	0.243 58	0.248 23	2 900	2 955

### 3.3 重复性和稳定性测试

继续用恒温油槽测试铂电阻薄膜温度传感器件样品,观察其重复性和稳定性。未退火样品和 500 °C、600 °C、700 °C 和 800 °C 退火样品的阻温特性,分别如图 7~图 11 所示。对比各样品曲线,可以发现未退火的电阻在多次测量的稳定性上不如退火处理后的样品。

经过退火处理后,铂电阻薄膜温度传感器件样品的升温降温曲线基本重合,升温电阻和降温电阻在多次测量能够很容易达到一致,证明退火处理的样品具有良好的稳定性和重复性,所以对铂电阻薄膜温度传感器件进行退火处理时很有必要的。

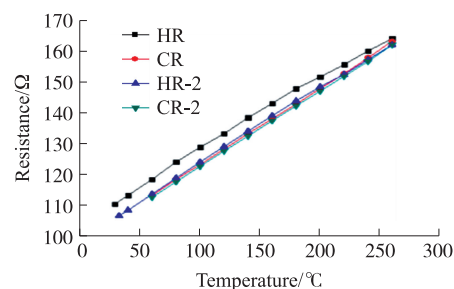


图 7 未退火样品阻温特性曲线  
(HR 代表升温,CR 代表降温,下同)

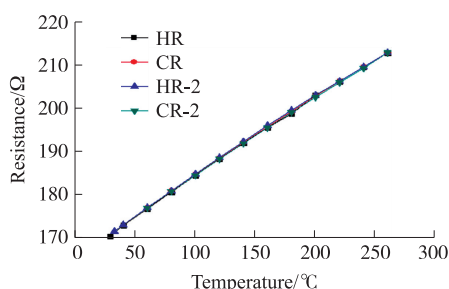


图8 500 °C退火样品阻温特性曲线

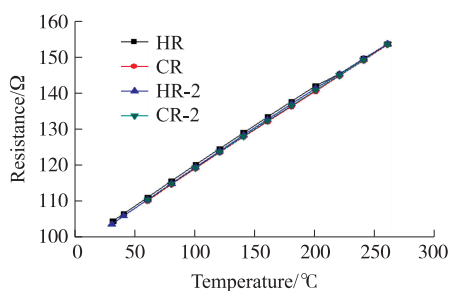


图9 600 °C退火样品阻温特性曲线

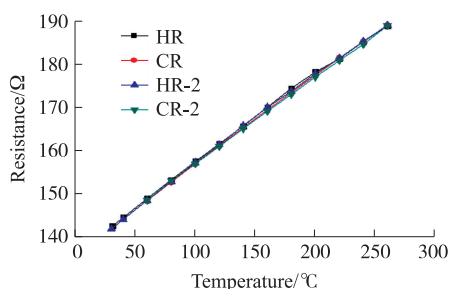


图10 700 °C退火样品阻温特性曲线

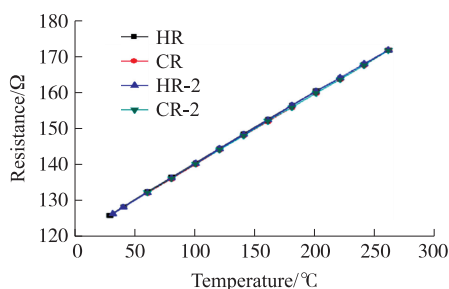


图11 800 °C退火后样品阻温特性曲线

## 4 结论

利用 MEMS 工艺在硅衬底上制备了铂电阻薄膜温度传感器器件,分别在 500 °C、600 °C、700 °C 和 800 °C 四种温度下对铂电阻薄膜样品进行了热处理,对样品在退火前后的电阻值进行了测试对比。测试结果表明,500 °C~700 °C 热处理,样品电阻随着退火温度的增大而增大;在 800 °C 热处理时样品的电阻出现了增大,主要是由于内部出现了团状结构。对 800 °C 的退火样品的阻温特性进行了多次测量,其在零摄氏度的电阻温度系数可达  $3\ 150 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。另外还对退火后的铂电阻薄膜温度传感器器件样品进行了多

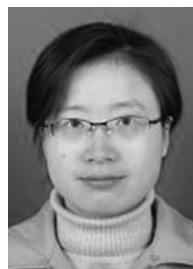
次升温降温测试,其升温曲线和降温曲线基本重合,表明退火处理可以明显的改善铂薄膜温度传感器的稳定性和重复性,从而降低测量误差。

## 参考文献:

- [1] 马洪宇,黄庆安,秦明. 谐振式 MEMS 温度传感器设计[J]. 光学精密工程,2010,18(9):2022-2027.
- [2] 周鹏程,王志. 基于铂电阻多测点温度测量系统及其应用[J]. 传感器与微系统,2019,38(6):158-160.
- [3] 胡鹏程,时玮泽,梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程,2014,22(4):988-995.
- [4] 张波,薛虹. 环境因素对微纳加工中精确定位影响的研究[J]. 微细加工技术,2007(5):5-9.
- [5] 刘阔,孙名佳,吴玉亮. 无温度传感器的数控机床进给轴热误差补偿[J]. 机械工程学报,2016,52(15):162-168.
- [6] 张恩忠,赵继,龚世军. 基于正交与插值算法的精密抛光平台综合误差建模与补偿[J]. 光学精密工程,2015,23(12):3422-3428.
- [7] 姜喜洋,任勇峰,贾兴中. 一种铂电阻温度传感器的优化设计[J]. 仪表技术与传感器,2017(11):10-13.
- [8] 胡鸿志. 基于新型温度传感器的数字温度计设计[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(8):741-744.
- [9] 梅加兵,刘景全,江水东. 用于低温环境的铂电阻温度微传感器[J]. 传感器与微系统,2013,32(4):119-121.
- [10] 端木丹丹,王海清,郑帮林. 栅丝型薄膜铂电阻表面温度传感器空间温度测量应用技术[J]. 仪表技术与传感器,2009(11):347-349.
- [11] Sreemany M, Sen S. Effect of Substrate Temperature and Annealing Temperature on the Structural, Electrical and Microstructural Properties of Thin Pt Films by rf Magnetron Sputtering[J]. Applied Surface Science,2006,253(5):2739-2746.
- [12] 王金鹏,周晨飞,梁军. 退火工艺对薄膜型铂电阻热阻特性的影响探究[J]. 机电工程技术,2019,48(8):26-28.
- [13] 金志军,邱萍,刘薇. 退火温度和退火时间对精密铂电阻温度计影响分析[J]. 计量与测试技术,2019,46(4):1-2.



侯晓伟(1985—),男,博士,高级工程师,从事轨道交通智能化传感器等方面的研究;



刘莉娜(1981—),女,硕士,讲师,主要从事电子控制方面的研究,37203334@qq.com。