

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311489

面向气象探空的微型热敏电阻设计及性能研究*

刘 熠^{1,2,3,4}, 王军华^{1,2,3}, 霍 鹏^{1,2,3,4}, 常爱民^{1,2,3}, 姚金城^{1,2,3}

(1. 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆电子信息材料与器件重点实验室 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院 北京 100049)

摘要:针对高空气象探测用温度传感器存在响应时间长、测温精度差以及辐射误差大等现状,研制了一种封装体积小、响应速度快、抗辐照能力强的温度传感器。采用固相法制备了 Mn-Ni-Cu-Fe-O 基片状热敏电阻,尺寸分别为 0.4 mm×0.4 mm×0.25 mm 与 0.6 mm×0.6 mm×0.25 mm。在片状热敏电阻敏感元表面依次沉积绝缘膜和铝金属反射薄膜。结果表明,研制的热敏电阻在-80℃~60℃范围内,其阻值范围分别为 1 000 kΩ~4.2 kΩ 与 375 kΩ~1.6 kΩ;热耗散系数为 1.034 mW/℃,响应时间为 0.63 s。利用太阳光模拟器对热敏电阻进行太阳辐射测温误差研究,在 100 W/m² 的辐照强度下测温误差最小为 0.22℃。该热敏电阻有望应用在高空气象探测的探空仪中。

关键词: 探空仪;热敏电阻器;微型化;快响应;太阳辐射

中图分类号: TH811 TN37 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 430.45

Design and performance study of miniaturized thermistor for meteorological sounding

Liu Yi^{1,2,3,4}, Wang Junhua^{1,2,3}, Huo Peng^{1,2,3,4}, Chang Aimin^{1,2,3}, Yao Jincheng^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of CAS, Urumqi 830011, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Urumqi 830011, China; 3. Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry of CAS, Urumqi 830011, China. 4. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In response to the common problems of long response time, poor temperature measurement accuracy, and high radiation error of temperature sensors used in high-altitude detection, a temperature sensor with small packaging volume, fast response speed, strong radiation resistance is developed. Mn-Ni-Cu-Fe-O-based chip thermistors with dimensions of 0.4 mm×0.4 mm×0.25 mm and 0.6 mm×0.6 mm×0.25 mm are prepared by the solid-phase method. On the sensitive surface of the chip thermistor, an insulation film and an aluminum metal reflector film are deposited sequentially. The results show that the resistance range of the developed thermistor is 1 000~4.2 kΩ and 375~1.6 kΩ in the temperature range of -80℃ to 60℃. Thermal dissipation and response speed tests are conducted on the thermistor, and the results show a thermal dissipation coefficient of 1.034 mW/℃ and a response time of 0.63 s for the developed sensor. The temperature measurement error of the thermistor is studied by using a solar simulator, and the minimum temperature measurement error is 0.22℃ under an irradiance intensity of 100 W/m². The thermistor has the potential to be used in the sounding instrument of high-altitude meteorological detection.

Keywords: radiosonde; thermistor; miniaturization; fast response; solar radiation

0 引言

高空气象探测是气象探测的重要组成部分,为天气的变化与预报,农业生活及科研工作提供重要的数据支撑^[1-2]。无线电探空仪是高空气象探测所依托的重要设备,它由氢气球携带升空,能够对空气温度、湿度和气压进行直接的测量,高度一般在30 km以内^[3]。其中温度检测不可或缺,对测温精度提出0.1℃的要求^[4-5]。但在温度探测过程中,为了使温度传感器更好地与空气进行热交换,往往会直接暴露在太阳光下,但是会造成温度传感器的温度升高,产生太阳辐射误差^[6]。随着海拔高度的增加,气压降低,温度传感器响应速度降低,造成垂直海拔高度上的测温滞后。太阳辐射逐渐增大,造成的辐射误差甚至达到5.1℃^[7]。因此,探空仪中的温度传感器需同时面临响应速度与测温精度的挑战。

目前针对高空气象探测环境,不同国家与地区对不同类型温度传感器进行了相应的研究。Rahayu等^[8]研究了一款针对探空仪的铂金属丝温度传感器,该温度传感器由0.025 mm直径的铂金属丝绕制而成,测温拟合精度在-83.7℃~27℃可达99%,但传感器测温精度较差,响应时间较长;丁枫等^[9]设计了一款铂电阻阵列球形温度传感器,不同的表面处理条件,使温度传感器的辐射误差不同,对其进行修正后,测温误差均方根为0.16 K,但工艺复杂,不利于工业化生产。刘清倦等^[10]采用热电偶作为温度传感器,利用铂电阻进行冷端补偿,并利用压电陶瓷在低风速环境下的震动来产生风速,可有效降低太阳辐射误差,提高测温精度,但热电偶较为容易受到干扰,增加测温不稳定性^[11]。而微型化负温度系数(negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻具有灵敏度高的特点,能检测出mK级别温度变化^[12],还由于其体积小,具有热惰性小、响应速度快、便于后期处理等众多优势^[13],被广泛应用于探空仪中^[14]。目前中国所采用的GTS-1型探空仪,采用棒状热敏电阻作为敏感元,利用环氧树脂绝缘封装,特征尺寸为0.8~1.1 mm,并在外层涂抹特制涂层作为反射层来降低太阳辐射误差,其体积较大,响应速度较慢,且太阳辐射测温误差较大^[15]。日本RS-11C探空仪,采用片状热敏电阻作为敏感元,其玻璃封装后整体为椭球型,横向直径为0.43 mm,纵向长度为0.8 mm,在外层镀制二氧化硅作为绝缘层,最外层镀制铝薄膜,其在1 000 hPa,无风状态下,响应时间为0.6 s^[16]。以上两种探空仪中的热敏电阻,由于封装方式的原因,体积较为明显地增大,增加了热敏电阻的响应时间与太阳辐射误差^[17]。因此对热敏电阻的封装方式进行改进具有较为重要的研究意义。

基于以上原因,本文设计了一种采用双层封装的片状热敏电阻,相较于传统的热敏电阻,该热敏电阻成功消除因封装带来体积倍增的负面影响,具备快速响应的同时,也具备较强的抗太阳辐射能力。

1 NTC热敏电阻工作原理及制备

1.1 NTC热敏电阻传感原理

随着电子元器件向微型化、集成化推进,NTC热敏电阻也逐渐向微型化和工业化方向发展^[18-19]。NTC热敏电阻是阻值随温度升高呈指数形式下降的一种敏感元,主要采用锰、铁、镍等过渡金属元素氧化物作为制备材料,通过不同的热处理手段,使其烧结成瓷^[20]。

测温特性体现在阻值与温度的对应关系上,其电阻值可由式(1)近似表示为:

$$R_T = R_0 \times \exp[B(1/T - 1/T_0)] \quad (1)$$

其中, R_T 为使用温区范围内温度为 T (K)时对应的电阻值; R_0 是在 T_0 温度时的对应电阻值; B 为材料常数,是热敏度指标, B 值越大,表示热敏电阻的灵敏度越高,它是通过两个温度下电阻值的自然对数之差与两个温度倒数之差的比值进行计算。如式(2)所示。

$$B = \ln\left(\frac{R_{T_1}}{R_{T_2}}\right) / \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (2)$$

除此之外,热敏电阻还有一些重要参数,包括标称电阻、电阻漂移率、热耗散系数 δ 、响应时间 τ 等。

1.2 片状热敏电阻制备

将分析纯级的 MnO_2 、 Ni_2O_3 、 CuO 及 Fe_2O_3 氧化物按金属阳离子摩尔比2:1:2:1的比例称取原料,经球磨混料后得到陶瓷粉料。使用模具将混合后的粉体材料压制成直径为15 mm,厚度约为10 mm的陶瓷圆锭,然后经300 MPa等静压工艺压制成陶瓷生坯。将所得的陶瓷生坯在1 100℃温度下烧结4 h。

利用切片机,将烧结后的陶瓷圆锭切割为厚度为0.25 mm的陶瓷薄片。并对陶瓷薄片进行二次烧结,温度为1 050℃,保温2 h。对陶瓷薄片两面进行银浆涂敷并烧渗。利用自动划片机将陶瓷薄片切割成尺寸为0.4 mm×0.4 mm×0.25 mm(A型)与0.6 mm×0.6 mm×0.25 mm(B型)片状敏感元,并在片状热敏电阻敏感元表面焊接直径为0.15 mm的单芯铜线作为电极引线。

将焊接引线后的片状热敏电阻敏感元表面化学沉积绝缘层。然后,放入磁控溅射仪中的基片上,靶材为铝靶材,纯度为99.99%, $\phi=60$ mm,厚度为2 mm,选定工艺条件为60 W,0.8 Pa,1 h,调整溅射功率,溅射气压等,制备出反射膜层,最终制得的片状热敏电阻如图1所示。

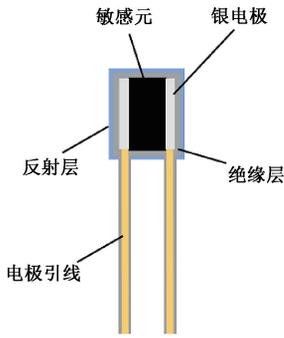


图 1 片状热敏电阻结构示意图

Fig. 1 Diagram of chip thermistor structure

2 微观形貌及物相表征

2.1 微观形貌分析

用型号为 ZEISS SUPRA55VP 的扫描电子显微镜 (SEM) 分别观测 $Mn_{1.0}Ni_{0.5}Cu_{1.0}Fe_{0.5}O_4$ 陶瓷薄片的表面形貌, 绝缘膜层膜厚以及反射膜层的表面微观形貌与膜厚, 如图 2 所示。从图 2 (a) 中看出, $Mn_{1.0}Ni_{0.5}Cu_{1.0}Fe_{0.5}O_4$ 陶瓷片晶粒充分生长, 陶瓷表面致密。图 2 (b) 为绝缘膜层厚度图, 制备的绝缘膜层厚度均匀, 约为 $6 \mu m$, 确保了绝缘膜层的气密性与绝缘性。图 2 (c) 为铝膜表面微观形貌, 可以看到铝金属颗粒均匀且致密, 图 2 (d) 为铝膜截面图, 铝膜厚度约为 $420 nm$ 。

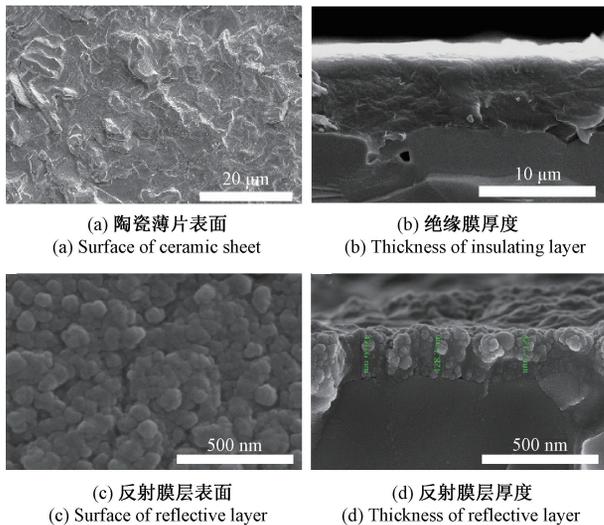


图 2 扫描电镜图

Fig. 2 Image of SEM

2.2 物相分析

对二次烧结后的陶瓷薄片进行 XRD 分析, 如图 3 所示。所制得的热敏电阻陶瓷结构为尖晶石 Fd-3 m 与单

斜立方 Cc 结构, 其中 Cc 结构应为析出的 CuO [21]。图 3 中衍射峰尖锐且半峰宽较窄, 展现出较好的结晶性。

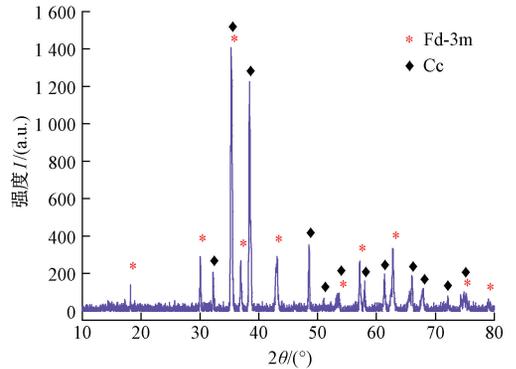


图 3 $Mn_{1.0}Ni_{0.5}Cu_{1.0}Fe_{0.5}O_4$ 陶瓷薄片 XRD 图谱

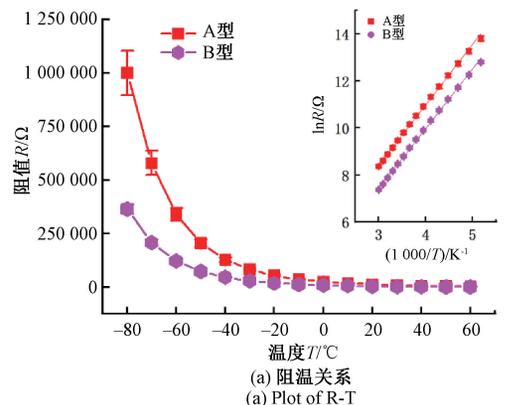
Fig. 3 XRD spectrum of $Mn_{1.0}Ni_{0.5}Cu_{1.0}Fe_{0.5}O_4$ ceramic sheet

3 实验性能表征

3.1 电性能分析

样品的阻值与温度关系利用恒温槽测得, 温度范围为 $-80^{\circ}C \sim 60^{\circ}C$, 步进为 $10^{\circ}C$ 。图 4 (a) 是片状热敏电阻敏感元的阻温关系图, 从图中可以看出, 在 $-80^{\circ}C \sim 60^{\circ}C$ 的温度范围内, A 型片状热敏电阻敏感元阻值变化情况约为 $1\ 000 \sim 4.2\ k\Omega$, $B_{25/50}$ 为 $2\ 700 \sim 2\ 750\ K$, B 型片状热敏电阻敏感元阻值变化情况约为 $375 \sim 1.6\ k\Omega$, $B_{25/50}$ 为 $2\ 590 \sim 2\ 650\ K$ 。图 4 (a) 中插图为样品的 $\ln R$ 与 $1\ 000/T$ 拟合直线, 经线性拟合后的所有样品 Pearson's $r > 0.999$ 、R-Square > 0.998 , 呈现出良好的线性关系, 表明所制备的片状热敏电阻敏感元具有良好的 NTC 特性。

图 4 (b) 为片状热敏电阻敏感元在 $125^{\circ}C$ 环境下贮存 500 h 的老化漂移曲线, 测试不同老化时间下阻值的变化情况。热敏电阻敏感元表现出较低的老化漂移率 $|\Delta R/R_0| \leq 0.23\%$, 表现出较好的稳定性。



(a) 阻温关系
(b) Plot of R-T

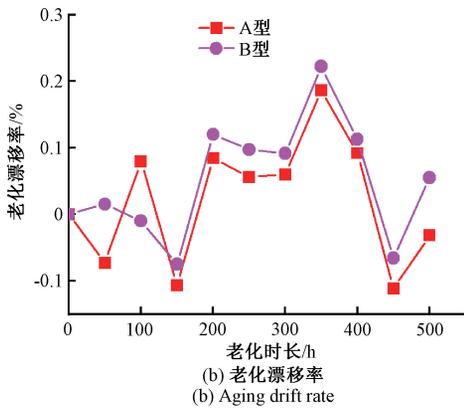


图 4 片状热敏电阻敏感元电性能参数
Fig. 4 Electrical performance parameters of $Mn_{1.0}Ni_{0.5}Cu_{1.0}Fe_{0.5}O_4$ chip thermistors

3.2 热敏电阻热耗散系数测试

本文利用低气压实验箱和吉时利 2612A 源表对片状热敏电阻进行不同气压环境下的热耗散系数测试,如图 5 所示。将热敏电阻置于低气压实验箱中,实现箱内环境从标准大气压至 1 kPa 的变化。采用分段电流测试的方式,使热敏电阻产生自热,并对样品的电阻进行实时采集,将其换算成实时温度。计算其功率 P 与温升 ΔT 的比值,即为该样品的热耗散系数 δ 。



图 5 热耗散系数测试仪器

Fig. 5 The test instrument of thermal dissipation coefficient

图 6 展示了两种尺寸片状热敏电阻在不同大气压下的热耗散系数。气压从 100 kPa 减小至 1 kPa,其中 A 型片状热敏电阻热耗散系数从 $1.034 \text{ mW} \cdot \text{C}^{-1}$ 降至 $0.931 \text{ mW} \cdot \text{C}^{-1}$ 。而 B 型片状热敏电阻热耗散系数从 $1.296 \text{ mW} \cdot \text{C}^{-1}$ 降至 $1.031 \text{ mW} \cdot \text{C}^{-1}$ 。可以看出, B 型片状热敏电阻较 A 型片状热敏电阻,热耗散系数相对增大,这与样品的体积有关。并且 B 型片状热敏电阻热耗散系数随气压的变化下降明显,这是由于体积增大,比表面积更大,更利于空气热对流换热,而随着气压的降低,空气热对流换热明显衰减,故其热耗散系数变化更为明显。

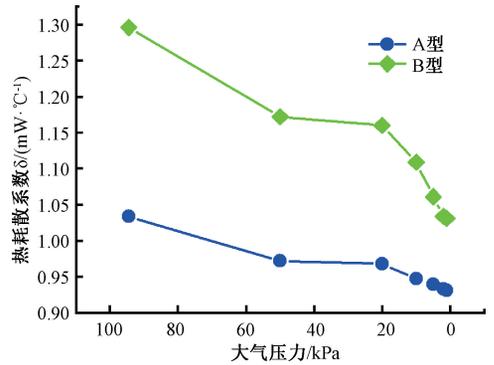


图 6 片状热敏电阻在不同大气压下的热耗散系数
Fig. 6 Thermal dissipation coefficient of chip thermistor at different atmospheric pressures

3.3 热敏电阻响应时间测试

采用与热耗散系数测试相同的仪器设备,将片状热敏电阻置于低气压实验箱中,实现箱内环境从标准大气压至 1 kPa 的变化,采用多阶恒流源测试方法,分别选取 4.0 mA 与 5.8 mA 作为激发电流,将两种片状热敏电阻分别加热至高于环境温度 50C 的温度 T_0 ,随着气压降低,激发电流相应减小。使样品在温度 T_0 保温 20 s,确保样品与周围环境达到动态热平衡,忽然断电,对样品的阻值进行实时采样,采样间隔为 0.01 s,采样周期为 20 s。

图 7 为不同尺寸片状热敏电阻在不同大气压下的响应时间,对比可以看出,常规大气压下,得益于体积的减小, A 型片状热敏电阻热容值较小,响应时间较短,为 0.63 s。而 B 型片状热敏电阻响应时间明显增大,为 1.2 s。随着样品体积的增大,热容值增大,响应时间明显增大。其中 A 型片状热敏电阻随气压的降低,响应时间从 0.63 s 增加至 1.55 s。B 型片状热敏电阻展现出相同的变化趋势,从 1.20 s 增加至 2.13 s。气压降低导致空气热对流换热减弱,热敏电阻需要更长的时间与周围

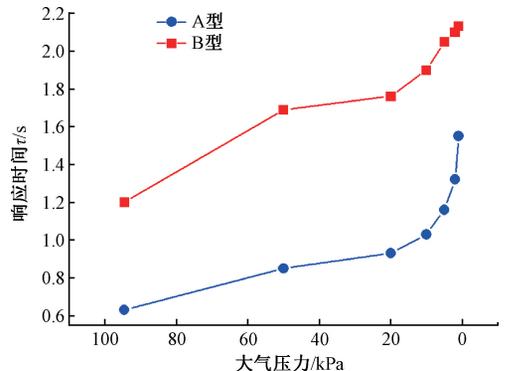


图 7 片状热敏电阻在不同大气压下的响应时间曲线
Fig. 7 Response time of chip thermistors at different atmospheric pressures

环境达到动态热平衡,两种片状热敏电阻的响应时间均随气压的降低相应增加。

3.4 抗太阳辐射性能测试

采用 Solar-500 太阳光模拟器,通过改变太阳光模拟器的激发电流大小以及样品与灯源滤光片的距离,实现不同太阳辐射的模拟强度。利用 3706A 台式数字万用表对辐照前后以及不同辐照强度下的 A 型和 B 型热敏电阻器的电阻值进行实时采样,如图 8 所示。通过阻值与温度的对应关系计算出测温误差 ΔT 。

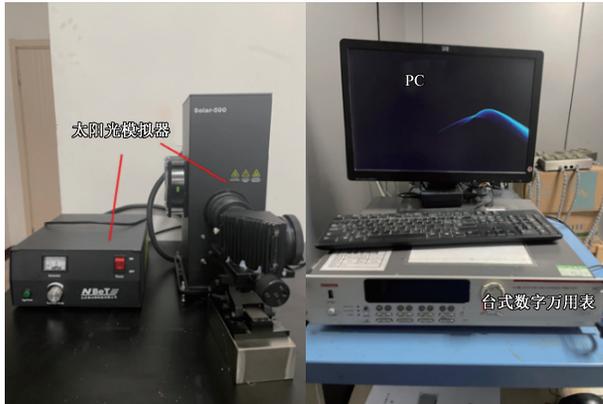
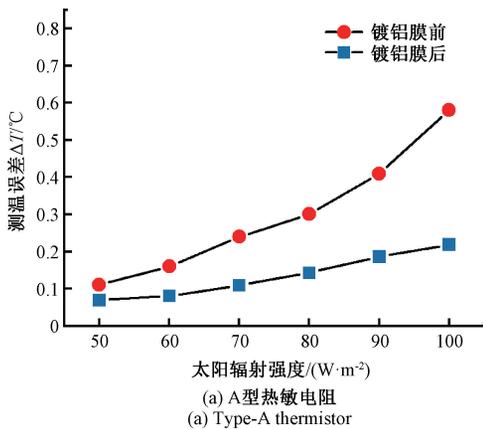


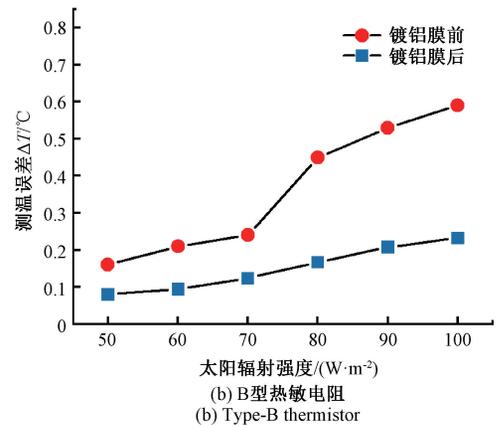
图 8 太阳辐射测温误差测试仪器

Fig. 8 Test instrument of solar radiation temperature deviation

通过改变模拟太阳光的辐照强度,对样品进行 $50 \sim 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 辐射强度的太阳辐射误差测试,如图 9 所示。图中 9(a) 为 A 型片状热敏电阻器镀铝膜前后的辐射误差对比,可以看出未镀膜前,在 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐照强度下,测温误差达 0.58°C ,通过增加铝反射膜后,测温误差降至 0.22°C 。图中 9(b) 为 B 型片状热敏电阻器镀铝膜前后辐射误差对比图,未镀膜前,在 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐照强度下,测温误差为 0.59°C ,镀制铝膜后,测温误差降至 0.23°C 。两种尺寸的片状热敏电阻器镀铝膜后均使测温误差明显降低,铝膜提高了样品表面反射率,降低了太阳辐射带来的测温误差。



(a) A型热敏电阻
(a) Type-A thermistor



(b) B型热敏电阻
(b) Type-B thermistor

图 9 片状热敏电阻镀反射膜前后辐射误差对比图
Fig. 9 Comparison of the temperature deviation of chip thermistors before and after plating with reflective film

4 结 论

本文针对探空仪中的温度测量,设计了带有绝缘层与反射层的片状热敏电阻,并对热敏电阻的电学性能与热耗散系数、响应时间和抗太阳辐射性能进行了表征。实验结果表明,尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ 的热敏电阻在温区范围内,阻值大小合适,线性度较高,稳定性好,老化漂移率 $\leq 0.19\%$,在常规大气压下,热耗散系数为 $1.034 \text{ mW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,响应时间为 0.63 s 。具有微型化、响应速度快、抗太阳辐射性能好等特点。为国产探空仪中的温度传感器提供新思路与数据支撑。

参考文献

- [1] 张大林. 大气科学的世纪进展与未来展望[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 812-824.
ZHANG D L. An overview of centenary advances and prospects in atmospheric sciences [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 812-824.
- [2] DIVYA U S, GIRIJA J, SATYANARAYANA S, et al. An advanced radiosonde system for aerospace applications[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(10): 2067-2077.
- [3] 曹晓钟, 郭启云, 杨荣康. 基于长时平漂间隔的上下二次探空研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 198-204.
CAO X ZH, GUO Q Y, YANG R K. Research of rising and falling twice sounding based on long-time interval of

- flat-floating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 198-204.
- [4] 任国玉, 任玉玉, 李庆祥, 等. 全球陆地表面气温变化研究现状、问题和展望[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 934-946.
- REN G Y, REN Y Y, LI Q X, et al. An overview on global land surface air temperature change[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(8): 934-946.
- [5] 杨加春, 王彦明, 李庆军, 等. 探空温度传感器误差预测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 24-36.
- YANG J CH, WANG Y M, LI Q J, et al. Research on error prediction technology of radiosonde temperature sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 24-36.
- [6] LEE S W, KIM S, LEE Y S, et al. Radiation correction and uncertainty evaluation of RS41 temperature sensors by using an upper-air simulator [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022, 15(5): 1107-1121.
- [7] ORGANIZATION W M. WMO guide to meteorological instruments and methods of observation [M]. Vienna: WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2008.
- [8] RAHAYU S A, SUNARYA R, MARYADI E, et al. Performance analysis of platinum wire temperature sensor for radiosonde[C]. Proceedings of the Proceedings of the International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science, 2021.
- [9] 丁枫, 刘清倦, 杨杰, 等. 用于气象探测的阵列式球形温度传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(7):16-20.
- DING F, LIU Q J, YANG J, et al. Design of array type spherical temperature sensor for meteorological detection[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(7):16-20.
- [10] 刘清倦, 施泓伊, 杨杰. 探空温度传感器辐射误差修正与实验研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(10): 15-20.
- LIU Q J, SHI H Y, YANG J. Experimental research on radiation error correction of sounding temperature sensor[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(10): 15-20.
- [11] RUFFIEUX D, JOSS J. Influence of radiation on the temperature sensor mounted on the swiss radiosonde[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(11): 1576-1582.
- [12] MACKLEN E D. NTC Thermistor materials [M]. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, 1991: 328-331.
- [13] LI H, ZHANG H, CHANG A, et al. Fast response and high stability Mn-Co-Ni-Al-O NTC microbeads thermistors [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(8): 3811-3817.
- [14] 李柏, 李伟. 阳江第八届国际探空系统比对试验综述[J]. 气象科技进展, 2011(3): 6-13.
- LI B, LI W. A review of Yangjiang 8th international radiosonde intercomparison [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2011(3): 6-13.
- [15] 郭启云, 李伟, 张玉存, 等. GTS1 型、GTS1-1 型、GTS1-2 型探空仪性能试验与对比分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(1): 5-10.
- GUO Q Y, LI W, ZHANG Y C, et al. Performance test and comparative analysis of GTS1, GTS1-1 and GTS1-2 radiosondes [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2012, 29(1): 5-10.
- [16] KOBAYASHI E, HOSHINO S, IWABUCHI M, et al. Comparison of the GRUAN data products for Meisei RS-11G and Vaisala RS92-SGP radiosondes at Tateno (36.06° & thinsp;N, 140.13° & thinsp;E), Japan[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(6): 3039-3065.
- [17] DE PODESTA M, BELL S, UNDERWOOD R. Air temperature sensors: Dependence of radiative errors on sensor diameter in precision metrology and meteorology[J]. Metrologia, 2018, 55(2): 229-244.
- [18] 莫以豪, 李标荣, 周国良. 半导体陶瓷及其敏感元件[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1983.
- MO Y H, LI B R, ZHOU G L. Semiconductor ceramics and their sensitive components[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1983.
- [19] FETEIRA A. Negative temperature coefficient resistance

(NTCR) ceramic thermistors; An industrial perspective[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2009, 92(5): 967-983.

- [20] 陆国权. 世界电子元件现状与发展趋势[J]. 世界产品与技术, 2003(12): 34-41.

LU G Q. World electronic components status and development trend [J]. Electronic Component News, 2003(12): 34-41.

- [21] FAN L, YAO J, HUO P, et al. A novel MnCoNiCuZnO₅ complex-phase ceramic for negative temperature coefficient thermistors [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 142: 106489.

作者简介



刘熠,2018 年于电子科技大学获得学士学位,现为中国科学院大学硕士研究生,主要研究方向为负温度系数热敏电阻器制备及性能研究。

E-mail: liuyi202@mails.ucas.ac.cn

Liu Yi received his B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2018. He is currently a master at University of Chinese Academy of Sciences. His main research interests include the preparation and performance study of negative temperature coefficient thermistor.



姚金城(通信作者),2014 年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院新疆理化技术研究所研究员,主要研究方向为负温度系数氧化物热敏陶瓷材料的制备及器件设计,高精度深海温度探测等。

E-mail: yaojc@ms.xjb.ac.cn

Yao Jincheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2014. He is currently a researcher at Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include the preparation and device design of negative temperature coefficient oxide thermal ceramic materials and the highly accurate temperature detection in deep sea.