

·光电器件与材料·

基于蓝宝石光纤的黑体腔瞬态高温传感器设计

李 伟, 郝晓剑, 周汉昌

(中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要:介绍了一种将接触式和非接触式相结合的蓝宝石光纤黑体腔瞬态高温传感器,从黑体腔制作和微光信号探测方面进行了详细分析,最后给出了实验结果.实验结果表明,由于采用新型光电探测器和膜层材料,大大提高了传感器的测温范围和信噪比.该高温传感器的测试范围上限大于 2 000 °C,响应时间小于 100 ms,能够满足科研和工业生产中特殊环境下的温度测量.

关键词:蓝宝石光纤;瞬态高温测量;黑体腔;光纤传感器

中图分类号:TP212.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2010)05-0054-04

Design of Black-Body Cavity Transient High Temperature Sensor on Sapphire Fiber

LI Wei, HAO Xiao-jian, ZHOU Han-chang

(Key Laboratory of Electronic Test & Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract:A sapphire fiber blackbody cavity transient high temperature sensor based on contact and contactless integration are introduced. The black-body cavity production and weak photoelectricity signal detection were analyzed. Finally, the testing results were also given. The experimental results show that after the new photoelectric detector and film material used, the temperature range and signal to noise ratio of the sensor was increased. The temperature sensor measuring range upper limit is greater than 2 000°C and the response time less than 100 ms. It can meet the temperature measurement required by the research and industrial production in some specific environment.

Key words:sapphire fiber;transient temperature measurement;black-body cavity;optical fiber sensor

瞬态高温的精确测量在冶金、航空、航天、化学等领域中具有十分广泛的应用,目前主要有非接触式的辐射测温和接触式的热电偶测温两种方式.与传统的热电偶温度计和辐射式温度计相比,光纤高温计不仅提高了接触法测温的测量上限^[1],延长了使用寿命,而且避免了辐射式测温的较大误差,提高了测量精度.由于蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)单晶物理化学性能稳定、机械强度高、硬度高、绝缘、耐腐蚀、折射率大,在 0.3~4.0 μm 波段范围内透光性很好,熔点高达 2 045 °C^[2,3],所以基于蓝宝石单晶光纤黑体

腔的温度传感器是解决瞬态高温测试的重要手段.

1 传感器工作原理

黑体腔高温传感器将接触式测温和辐射式测温相结合,并以黑体辐射理论为基础,只要测定物体的辐射强度,就可确定出辐射体的亮度温度.首先在单晶蓝宝石光纤的一端镀制一层敏感材料薄膜形成黑体腔探头,并将探头放入被测温度场中,由黑体腔快速感知热量与被测温度场达到热平衡产生光辐射信

收稿日期:2010-09-16

基金项目:国家部委“十一五”基础科研项目资助;电子测试技术国家重点实验室资助项目(9140C1204040705)

作者简介:李伟(1985-),男,硕士研究生.主要研究方向为光电检测技术;瞬态高温测试技术.

号,并经光纤传输通过波长为 680 nm 的干涉滤光片,再由 SSPM(固态光电倍增管 Solid-state Photomultiplier)接收,最后通过信号处理电路输出结果.传感器的工作原理如图 1 所示.

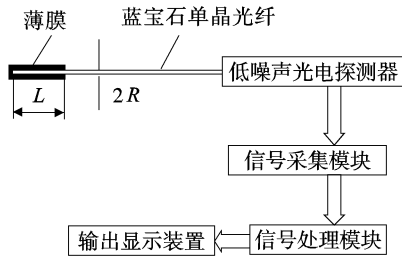


图 1 传感器工作原理框图

2 光纤黑体腔的构成

黑体腔探头的设计是蓝宝石光纤高温传感器研制的关键,探头的结构、材料及镀膜工艺决定着传感器的测温上限、动态响应以及使用寿命,也决定着探头本身的热辐射特性,从而影响到传感器的测温精度、重复性与稳定性.

2.1 空腔形状的选择

腔体形状的选择基于腔口发射率和实际加工工艺的考虑.最常用的有锥型腔、圆柱型腔、球型腔和带孔圆柱筒型腔等,有的还为了提高发射率在空腔底部采用正锥、倒锥或沟槽结构^[4].如图 2 所示.图中 1~3 为圆锥腔,4~6 为圆柱腔,7 是球型腔,8 是带孔圆柱筒腔.

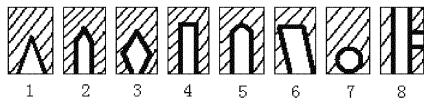


图 2 人造黑体腔的形状

黑体腔有效发射率的计算模型分为:漫射模型、完全镜反射模型、均匀镜漫反射模型、非漫射模型等.在计算方法上又分为积分方程理论、多重反射理论、蒙特卡洛方法等.因基于多重反射理论的 Gouffe 理论计算简便,所以对发射率的计算采用 Gouffe 理论的经验公式计算以上各种类型的腔型,当腔体材料或涂层的发射率 $\epsilon > 0.99$ 时,其中以球型腔和带孔圆柱筒型腔的发射率为最高圆柱型腔次之.针对蓝宝石光纤采用圆柱型腔作为黑体腔的腔型.

由于感温膜层具有较高的导热率和细小的光纤基体,所以感温探头能与被测热源迅速达到热平衡.

若光纤感温腔的轴向长度足够小,则可认为处于热平衡下的感温腔为一等温腔.又因蓝宝石晶体的折射率 $n = 1.75$,最后能从端面出射的黑体腔的光辐射在传输时只能限制在沿光纤轴很小的立体角内,因此可认为沿光纤轴传输的是一维光.基于以上假设,根据式(1)、式(2)计算出,当光纤感温层材料发射率 ϵ 大于 0.5 时,感温腔结构尺寸 L/R 大于 20 时,腔口有效发射率 ϵ_0 就非常接近 1.因此黑体腔的长度应满足 L 与 R 之比在 20 左右.

2.2 黑体腔膜层材料的选择

构成光纤黑体腔的薄膜材料应具备以下特征:熔点高,一般在 3 000 °C 以上;能承受高温烧蚀的恶劣环境,并与光纤基体(蓝宝石)有良好的附着力;高温下的导热系数、发射率等物化性能稳定,且抗氧化性好;高温下具有较高的导热系数和辐射发射率,且热容量较小.

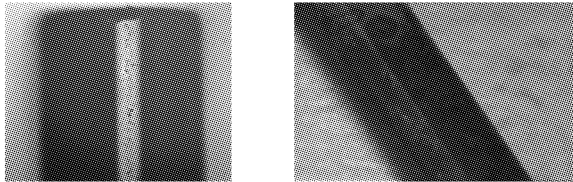
耐高温材料主要有金属材料和非金属材料.前者如钨、钼、钽、铌、铬、钛、锆等难熔金属;后者如氧化铝、碳化硼、碳化硅、氮化硼、氮化硅、磷化硼、磷化硅等.表 1 为高熔点金属^[5],由于金属具有较高的导热率,所以一般使用金属作为黑体腔的膜层.

表 1 高熔点金属

金属	熔点/°C	金属	熔点/°C
钨(W)	3 410 ± 20	铪(Hf)	2 110 ± 20
铼(Re)	3 180 ± 20	铑(Rh)	1 996 ± 3
钽(Ta)	2 996 ± 50	铬(Cr)	1 890 ± 10
锇(Os)	2 700 ± 200	锆(Zr)	1 830 ± 40
钼(Mo)	2 625 ± 50	钍(Th)	1 827 ± 50
钌(Ru)	2 500 ± 100	铂(Pt)	1 773 ± 1
铱(Ir)	2 454 ± 3	钒(V)	1 735 ± 50
铌(Nb)	2 415 ± 15	钛(Ti)	1 725 ± 10

经过多次试验将使用钽、钼和碳化钨作为黑体腔探头的膜层材料,但是钽和钼在高温下极易氧化,所以需要在膜层钽和钼外面镀制一层氧化锆膜层来防止钽和钼在高温下氧化.经过试验得出,利用磁控溅射技术将钼作为膜层材料再在钼的外面镀上氧化锆膜层是一种很好的方案,钼能够与蓝宝石光纤有很好的结合强度,并且在高温下不容易脱落.图 3 为钼膜层加氧化锆膜层在 1 550 °C 下加热后的情形,其放大倍数约为 120 倍.由图 3 可见黑体腔并没有出现膜层

脱落和膜层破裂现象,说明此种组合有较好的致密度和强度.但是黑体腔表面出现白斑,是由于氧化锆在高温下发生相变,在 1 100 ℃ 由单斜相转变为四方相,在冷却时又由四方相转变为单斜相所致.



(a) 加热之前 (b) 加热之后

图 3 钼膜层加氧化锆膜层在 1 550 ℃ 下加热后的情形

3 光辐射探测与处理模块

微光信号探测也是此传感器的关键技术之一.微光探测器的性能也影响着该传感器的动态响应特性.该探测模块由 Ireland 的 A35HD - TO18 SSPM (如图 4 所示)和与之配套的跨阻放大器组成,该模块主要进行微光信号的探测和放大,有较好的信噪比并可同时检测交流和直流信号.其中 SSPM 接收面积约为 1 mm²,并可与蓝宝石光纤直接耦合,简化了光电转换模块的结构设计,使得模块体积缩小.该 SSPM 由于采用面阵排列并工作于 Geiger 模式,因此该 SSPM 具有很高的内部增益(4×10^5)和快速的响应特性(响应时间小于 1 ns).图 5 为该探测器的光子探测效率,可见在可见光范围内具有较高的探测效率.根据维恩定律得知温度越高,其辐射强度最大波长越短,所以此 SSPM 符合高温测试需求.



图 4 SSPM 探测器

4 实验数据与分析

4.1 SSPM 性能测试

SSPM 作为一种新型的光电检测器件,测试其

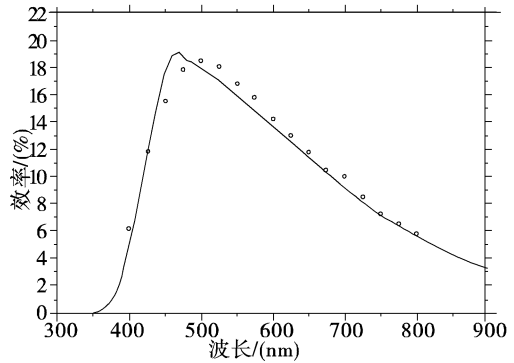


图 5 光子探测效率与波长的关系

光电性能对光纤黑体腔的性能测试有重要作用.在暗室条件下,用信号发生器产生不同幅值的正脉冲信号驱动 $\phi 5$ mm 的红光 LED,其波长为 650 nm,测出 LED 驱动电流与光照度的关系和 SSPM 接收对应光照度的输出电压,如图 6、图 7 所示.由此得出, A35HD - TO18 SSPM 的输出近似于线性,具有良好的输出特性;当光通量大于 1.75×10^{-7} lm 时, SSPM 输出趋于饱和,在 200 kHz 处探测器输出信号发生失真,符合实际测温要求.

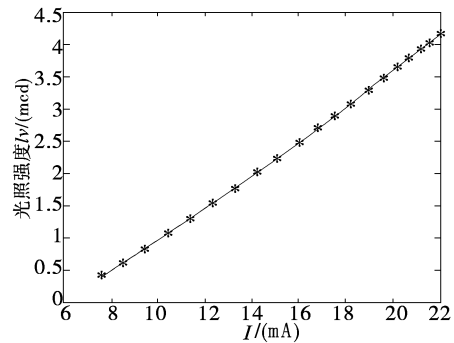


图 6 LED 电流与产生的光照强度的关系

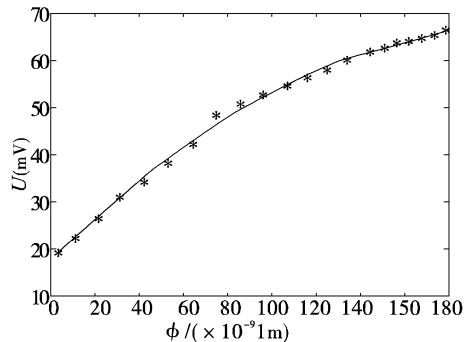


图 7 光通量与 SSPM 输出电压关系

4.2 传感器性能测试

传感器测试装置由蓝宝石传感器、氢氧焊机(作为热源)、红外辐射测温仪、示波器构成,如图 8 所示.



图 8 传感器测试装置示意图

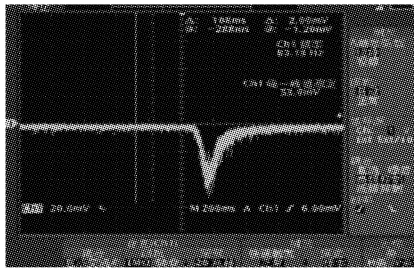


图 9 传感器输出信号

其中,氢氧焊机火焰可达 2 800 ℃;红外辐射测温仪测温范围为 1 000~3 000 ℃,该测温仪已经通过高温黑体炉校准.首先开启氢氧焊机并调节其气阀达到所需温度,通过红外测温仪测得其温度,然后将传感器黑体腔探头快速掠过热源测得其信号,如图 9 所示.这是在温度为 1 220 ℃时所采集的信号,其加热次数大于 5 次,并且每次都能得到较好的信号,可

见其具有很好的重复性.

5 结 论

通过以上分析和实验,得出蓝宝石光纤黑体腔高温传感器可以在高温环境下测得被测温度场的瞬态温度,并且温度越高测得的结果越准确.其测温上限可大于 2 000 ℃,响应时间小于 100 ms,可对各种瞬态变化过程进行测试,由于光纤高温传感器具有测温范围广、精度高和响应快等优点,它将在化工、能源、冶金和科学研究中得到广泛的应用.

参考文献

- [1] 朱麟章. 高温测量原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 1991:1-2.
- [2] 叶林华. 传感器与传能用蓝宝石单晶光纤的生长与光学特性[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(3): 221-225.
- [3] Dils R R. High-temperature optical fiber thermometer [J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3): 1198.
- [4] 陈衡. 红外物理学[M]. 北京:国防工业出版社, 1985: 97-98.
- [5] I E 坎柏尔. 高温技术[M]. 北京:科学出版社, 1961: 10-11.

(上接第 7 页)

光源发出的光线经过聚光镜 L_1 后汇聚于 F_2 处,形成光源像, F_2 是聚光镜 L_2 的前焦点,因而光源像的每一点经聚光镜 L_2 后都以一束平行的光线照明分划板.

这种新型的投影仪照明系统克服了临界照明不均匀的缺点,照明效果很好.

系统中采用 4×4 的高亮度 LED 发光模组作为光源^[3],其发散角为 80° ,色温为 6 500 K,光通量为 850 lm,功率为 10 VA. 聚光镜有效通光口径为 26 mm,分划板单幅图案尺寸为 11.2×7.5 ,则可计算出光源到 L_1 的距离 d_1 为 8.53 mm,设光源与光源像尺寸相同, L_1 到分划板距离为 40 mm,则有

$$f_2 + d_1 + d_2 = 40 \quad (4)$$

$$\frac{1}{d_2} - \frac{1}{f_2 + d_1} = \frac{1}{f_2} \quad (5)$$

可得 $f_2 = 19.8, d_2 = 11.67$.

3 测量数据与结果

经过上面的分析以后,对以上 4 种照明系统方案分别进行了实验验证,其试验数据如表 1 所示:

表 1 4 种照明系统方案试验数据

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
照度/(lx)	155	197	300	248
均匀度	96%	86%	49%	99%

以上数据在外界照度为 3.8 lx 的环境中测得.

根据以上方案分析和实验,可以看出,采用二次成像的照明方式作为视标投影仪的照明系统研制的视标投影仪投影图案照度和对比度均达到要求,且明显优于其他照明系统.

(下转第 82 页)