

⑦ 437-442

蓝宝石单晶光纤高温仪的研制*

叶林华 沈永行

(浙江大学物理系, 浙江, 杭州, 310027)

TH811.2

摘要 报道了双波长蓝宝石单晶光纤高温仪的研制工作, 对蓝宝石单晶光纤高温传感头的热辐射特性进行了理论分析和实验研究, 并在此基础上研制了双波长蓝宝石单晶光纤高温仪, 仪器的测温范围为 800~1700℃, 测温精度可望达到 0.2% (1000℃时), 分辨率为 1℃, 可应用于科研和工业生产中某些特殊环境下的温度测量。

关键词 蓝宝石光纤, 光纤传感, 辐射测温.

高温仪

引言

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, 本质绝缘, 耐腐蚀, 在 0.3~4.0 μm 波段范围内透光性很好, 熔点高达 2045℃, 是一种优良的近红外耐高温光学材料, 蓝宝石单晶光纤既具有蓝宝石的优良性能又有光波导的特点, 是目前在高温环境下最适用的光波导材料之一, 在高温光纤传感和近红外传感等领域具有很好应用前景. 本文报导了双波长蓝宝石单晶光纤高温仪的研制工作. 对蓝宝石单晶光纤高温传感头的热辐射特性进行了理论分析和实验研究, 并在此基础上研制成双波长蓝宝石单晶光纤高温仪.

1 双波长蓝宝石单晶光纤高温仪结构

1.1 蓝宝石单晶光纤高温传感器

蓝宝石单晶光纤高温传感器主要由蓝宝石光纤高温热传感头, 及热传感头辐射信号的传输和探测部件等组成^[1]. 在蓝宝石光纤的一端涂覆高发射率的感温介质薄层并经高温烧结形成一微型的光纤感温腔(热传感头). 当热传感头深入到热源时光纤感温腔与周围环境迅速达到热平衡, 感温腔辐射的光信号经蓝宝石光纤传输, 所用的蓝宝石单晶光纤直径一般为 0.6~1.0mm, 长为 10~50cm, 因此需要用一根大芯径石英光纤或光纤束与蓝宝石光纤耦接以传输能量, 辐射光信号经透镜分束通过两选定的干涉滤光片(中心波长分别为 820nm 和 940nm, 带宽为 30nm)后由硅光电池探测接收.

蓝宝石单晶光纤用激光加热小基座法(简称 LHPG 法)生长^[2], 光纤几何轴与 c 光轴重合, 在近红外波段蓝宝石单晶光纤有良好的透过率, 在可见光区透过率有所下降^[1], 主要是由于光纤内部色心引起的吸收, 蓝宝石单晶光纤在近红外波段的本征吸收是很小的, 其损耗

*“863”计划(编号 715-011-007)和国家自然科学基金(编号 69407004)资助项目
稿件收到日期 1997-01-17, 修改稿收到日期 1997-05-14

主要是由于光纤生长过程中光纤内部和表面存在的晶体缺陷等引起的散射损耗所致。

1.2 光电流信号的放大和处理

图 1 为硅光电池输出光电流信号的放大和处理框图,两路硅光电池输出的光电流信号经电流电压转换和程控放大送到 14 位 A/D 转换器进行模数转换,由于感温腔单色辐射强度随着温度的升高按指数增长,系统采用两级程控放大器其动态范围达到 110dB,8098 单片机根据检测到的两路信号值经过计算和查表,得到相应的温度值,送到 LED 进行显示。

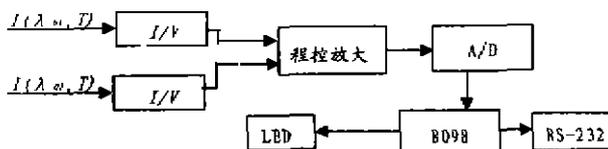


图 1 蓝宝石光纤高温仪系统框图

Fig. 1 System diagram of the sapphire fiber thermometer

2 蓝宝石单晶光纤温度探头的热辐射特性

蓝宝石单晶光纤探头目前主要有两种制作方法,一种是蓝宝石单晶光纤的一端蒸镀一层铂或铱的薄膜构成金属腔,为防止金属在高温下的挥发再蒸镀一层 Al_2O_3 保护膜,这一方法制作成本较高,另一种是在蓝宝石单晶光纤的一端涂覆高发射率的感温介质(陶瓷)薄层并经高温烧结形成一微型的光纤感温腔,这种感温介质必须能满足耐高温、高温稳定性好、且与蓝宝石单晶光纤基体结合牢固等一系列苛刻的要求,因此必须经过反复试验和筛选,这一方法制作简单且能满足一般要求。

蓝宝石单晶光纤感温腔的热辐射特性是研制蓝宝石单晶光纤高温仪的基础,需要对其进行仔细分析,当光纤感温腔端部与待测热源接触时,由于感温腔膜层很薄,光纤基体细小热容量极小,所以感温腔与热源很快处于热平衡状态,若光纤感温腔的轴向长度尺寸足够小,则可以认为处于热平衡状态下的感温腔是一等温腔。

光纤感温腔的内表面为感温介质与单晶光纤的界面,在高温条件下,感温腔内部不是镜面反射而是漫反射和漫发射,则感温腔内表面任一微元面上的有效辐射是半球漫发射和漫反射之和。

另外蓝宝石单晶的吸收系数在很宽的温度范围内为 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm}^{-1}$,而光纤芯径只有数百 μm ,所以感温腔内表面每次反射和发射过程中吸收很小,即对热辐射而言腔内蓝宝石光纤接近全透明,因此光纤感温腔内表面的热辐射相当于空腔的热辐射,我们合理地把蓝宝石光纤感温腔看作一等温圆柱漫射空腔,从空腔热辐射的古费(Gouffe')理论^[4]我们可以推得等温圆柱形漫射空腔腔孔的有效发射率为

$$E_o = \frac{\epsilon[1 + (1 - \epsilon)(0.25g - 0.1875g^2)]}{\epsilon + (1 - \epsilon)(0.25g - 0.125g^2)}, \quad (1)$$

式(1)中 $g = D/L$, L 为圆柱感温腔长度, D 为圆柱的直径, ϵ 为感温介质膜层材料的发射率,式(1)表明光纤感温腔腔孔的有效发射率,它不仅取决于膜层材料的发射率,而且还和感温腔的结构尺寸 L 、 D 密切相关。

图 2 为光纤感温腔腔口有效发射率理论计算结果,从图中可看出当选择的光纤感温腔

膜层材料发射率 ϵ 大于 0.5, 感温腔结构尺寸 L/D 大于 10 时腔口有效发射率 E_0 就非常接近 1, 而且是一个稳定的值, 这样蓝宝石光纤感温腔就可以被看作为一光纤黑体腔. 考虑到实际使用时蓝宝石光纤应有足够的强度, 我们选择用于高温传感的蓝宝石光纤的直径为 $700\mu\text{m}$ 左右, 光纤感温腔的长度应大于 7mm , 这个尺寸一般已能满足实际应用场合对探头空间分辨率的要求. 实验测定了光纤黑体腔 820nm 波段(带宽为 30nm)辐射强度随温度变化与理论值一致^[1]. 一般的非接触式辐射温度计测定温度时, 由于被测物的发射率往往随温度、波长、表面形状等条件不同而有很大变化, 故很难得知被测物温度的准确值, 而蓝宝石光纤温度传感器通过直接探测光纤黑体腔本身的热辐射来探测所处环境的温度因此具有很高的测温精度和测温灵敏度.

蓝宝石光纤传感器的热响应频率主要由形成光纤黑体腔的介质膜层厚度和介质材料的热导率决定, 介质材料可以为耐高温金属膜或高温陶瓷涂层, 厚度一般为几个 μm ~几十个 μm , 金属膜光纤黑体腔热响应快, 但在高温下易氧化和挥发导致性能不断劣化, 且制作成本昂贵. 高温陶瓷黑体腔制作方便, 抗氧化性好, 热响应比金属膜腔稍差, 但已能满足大多数测温场合的要求, 对一种涂层厚度约为 $50\mu\text{m}$ 高温陶瓷黑体腔我们从实验上作了定性研究, 实验装置如图 3 所示, 一斩波的 CO_2 激光束聚焦到蓝宝石光纤温度传感头上, 成为周期性的热信号, 感温介质膜层吸收 CO_2 激光束能量产生热辐射, 通过在示波器上观察传感头的热辐射信号, 可以看出其能否反映信号的周期性变化, 调节斩波频率, 发现传感头能分辨高达 2kHz 频率的热信号变化.

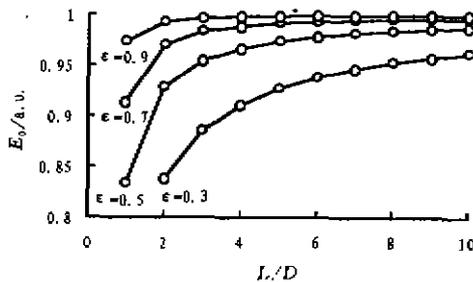


图 2 光纤感温腔腔口有效发射率理论计算
Fig. 2 Theoretical value of the apparent emittance of fiber cavity

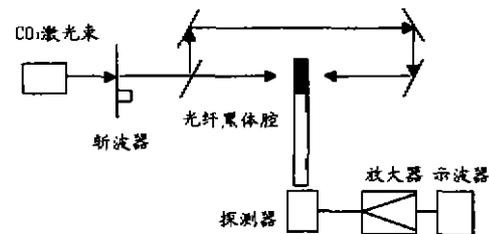


图 3 感温腔频响测试装置
Fig. 3 Set-up of frequency response measurement for the fiber cavity

3 双波长蓝宝石光纤高温仪的理论计算

根据 Planck 黑体辐射定律, 光纤黑体腔置于温度为 T 的区域时, 其单色辐射光通量为

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{ac_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \quad (2)$$

式(2)中 a 为腔出口进入光纤的面积, λ 为辐射光波长, T 是绝对温度, $c_1 = 3.74183 \times 10^{-16} \text{Wm}^2$ 为第一辐射常数, $c_2 = 1.43879 \times 10^{-2} \text{mK}$ 为第二辐射常数, 设干涉滤光片的光谱响应函数为 $f(\lambda)$, 硅光电池的光谱响应函数为 $D(\lambda)$, 考虑到更一般的情况, 设传感头的单色发射率为 $\epsilon_A(\lambda)$, 干涉滤光片的中心波长为 λ_0 , 带宽为 $\Delta\lambda$, 辐射光信号经光纤传入硅光电池后

输出的光电流为

$$I(\lambda_0, T) = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \eta(\lambda) \times f(\lambda) \times D(\lambda) \times \epsilon_A(\lambda) \times \varphi(\lambda, T) d\lambda, \quad (3)$$

式(3)中 $\eta(\lambda)$ 反映光信号传输过程中光纤(包括蓝宝石单晶光纤和普通石英粗光纤)的传输损耗, 光纤耦合器和其它光学元件的插入损耗引起的辐射能损失, $\eta(\lambda) < 1$, 当干涉滤光片的带宽足够窄时, 我们假设: $\eta(\lambda) = \eta(\lambda_0)$, $\epsilon_A(\lambda) = \epsilon_A(\lambda_0)$, $f(\lambda) = f(\lambda_0)$, $D(\lambda) = D(\lambda_0)$, 并代入式(3)可得硅光电池的光电流输出为

$$I(\lambda_0, T) = \eta(\lambda_0) \times f(\lambda_0) \times D(\lambda_0) \times \epsilon_A(\lambda_0) \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \varphi(\lambda, T) d\lambda. \quad (4)$$

假设两干涉滤光片的中心波长分别为 λ_{01} 、 λ_{02} , 两路硅光电池输出的光电信号相应为 $I(\lambda_{01}, T)$ 、 $I(\lambda_{02}, T)$, 则它们的比值为:

$$R(T) = I(\lambda_{01}, T) / I(\lambda_{02}, T) = K \times R'(T), \quad (5)$$

式(5)中

$$K = \frac{\eta(\lambda_{01}) \times f(\lambda_{01}) \times D(\lambda_{01}) \times \epsilon_A(\lambda_{01})}{\eta(\lambda_{02}) \times f(\lambda_{02}) \times D(\lambda_{02}) \times \epsilon_A(\lambda_{02})}, \quad (6)$$

$$R'(T) = \frac{\int_{\lambda_{01} - \Delta\lambda/2}^{\lambda_{01} + \Delta\lambda/2} 1/\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1] d\lambda}{\int_{\lambda_{02} - \Delta\lambda/2}^{\lambda_{02} + \Delta\lambda/2} 1/\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1] d\lambda}. \quad (7)$$

从式(6)可见, K 是一个与温度无关的常数, 这里忽略了温度变化引起两个波段损耗比的变化和表观发射率比的变化. 分析表明^[3], 蓝宝石单晶光纤材料即使在高温条件下, 其吸收系数也很低, 高温自辐射很小, 在这两个波长上吸收系数的比值从室温到 2020℃ 的温度变化小于 0.1%, 这个变化量对温度检测精度的影响远小于 0.05%. $R'(T)$ 经过计算机数值积分计算后得到, 图 4 为计算机对式(7)进行数值积分计算得到的 820nm 波段和 940nm 波段辐射光信号比值随温度变化的理论曲线, 从图中可以看出比值随温度升高而单值增加, 但增加速度变慢, 我们把各个温度 T 对应的 $R'(T)$ 值作为一个表格存放于单片机系统的 ROM 中, 8098 单片机检测两路辐射光信号, 得到两信号的比值, 通过查表, 就可以得到相应的温度, 其相差的系数 K 通过定标来确定, 由于 K 是一个与温度无关的常数, 因此只需在单一温度点下定标.

4 实验结果

在一个高温炉的炉膛中, 我们用一个经过校准的铂铑温差电偶对高温仪进行定标和校准, 实验时铂铑温差电偶探头与光纤感温热传感头放在一处, 使其置于同一温区, 在某一温度(例如 1000℃)时对高温仪进行定标以确定系数 K , 然后让炉膛温度从室温升高, 当温度

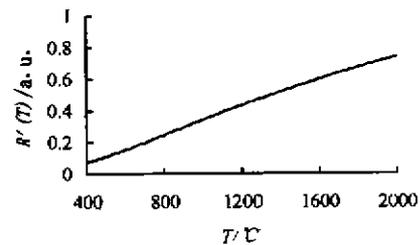


图 4 $R'(T)-T$ 理论计算曲线
Fig. 4 Theoretical value of $R'(T)-T$

高于 800℃ 时高温仪稳定显示温度值,与铂铑温差电偶指示温度一致,在低温端由于硅光电池接收到的辐射光信号很微弱,受放大器的零漂和 A/D 转换器的精度影响,高温仪显示的温度值有所波动。表 1 所示为铂铑温差电偶所测温度与高温仪所测温度对照。由于受高温炉最高温度限制,表 1 中最高温度为 1200℃。仪器的最高工作温度主要受蓝宝石单晶光纤材料在高温下的稳定性限制,试验表明当蓝宝石单晶光纤材料处于温度高于 1700℃ 的环境下,其表面有所劣化,透过率下降,因此实际使用时须将裸露的蓝宝石单晶光纤材料外面加以保护层,以抑制表面劣化,经过这样处理后,高温仪长时间使用于工作温度高达 1800℃ 的中频石英管炉炉膛作温度监测时,未发现明显性能劣化。

表 1 温差电偶与高温仪所测温度对照
Table 1 Comparison of the temperature values measured
by the rnocouple and sapphire fiber thermometer

温差电偶(℃)	740	760	780	800	850	900
高温仪(℃)	735	757	779	800	849	900
温差电偶(℃)	950	1000	1050	1100	1150	1200
高温仪(℃)	949	1000	1051	1100	1151	1201

5 蓝宝石光纤高温仪的应用

蓝宝石光纤高温仪根据不同的应用场合可以分为接触式辐射测温和非接触式辐射测温两种主要应用方式。

5.1 接触式辐射测温方式

接触式辐射测温方式是本文重点介绍的光纤感温腔型,蓝宝石光纤感温腔型由其自身形成黑体部分,通过由此发出的辐射光强来测量温度,因此测温精度较高,同时由于蓝宝石光纤的强度及高温稳定性很好,已被成功用于航空涡轮发动机作燃气温度监测、风洞实验中高温高速热气流温度测量研究等恶劣环境下的温度测量,也可用于一般气氛下的高精度温度测量控制。在热响应性方面,由于感温腔的膜层可以很薄,选择热导率较高的感温介质,其频响可以很高,配以高速辐射信号处理系统,被用于检测燃气轮机燃烧气体快速温度变化。

5.2 非接触式辐射测温方式

非接触式辐射测温方式应用时蓝宝石光纤测温端不涂覆感温介质,即是裸露的,蓝宝石光纤的前端相当于辐射温度计的物镜,能够接近高温被测对象或插入使用,与一般的非接触式辐射温度计相比具有以下特点:(1)易于阻断杂散光;(2)在光路中没有光的吸收;(3)易于对准目标,被应用于物体表面温度测量。

6 结语

蓝宝石光纤高温仪具有测温精度高,灵敏度好等优点,研制成双波长蓝宝石光纤高温仪,仪器的测温范围为 800~1700℃,测温精度为 0.2%(1000℃时),分辨率为 1℃。目前该高温仪已实际应用于工作温度高达 1800℃ 的中频石英管炉炉腔温度监测和风洞实验中高温高速热气流温度测量。

REFERENCES

- 1 YE L H. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(叶林华, 红外与毫米波学报), 1997, 16(3):221
- 2 Feigelson R S, Keay W L, Route R K. *Optical Engineering*, 1985, 24:1102
- 3 Dils R R, Geist J, Reilly M L. *J. Appl. Phys.*, 1986, 59(4):15
- 4 CHEN H. *Infrared Physics*, Beijing: National Defence Industry Publishing House(陈 衡, 红外物理学, 北京:国防工业出版社), 1985

DEVELOPMENT OF A SAPPHIRE FIBER THERMOMETER *

YE Lin-Hua SHEN Yong-Hang

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The development of a sapphire fiber thermometer using two wavelength bands was reported. Theoretical and experimental studies were made on its thermal radiance. On this basis, a sapphire fiber thermometer using two wavelength bands was developed for use from 800 to approximately 1700 C. The instrument has the accuracy of 0.2% at 1000 C and a resolution of 1 C. There appears to be a number of applications of the instrument both in science and industry with some specific environment for temperature measurement.

Key words sapphire fiber, optical fiber sensor, thermal radiance temperature measurement.

* The project supported by the High-Technology Foundation and the National Natural Science Foundatin of China
Received 1997-01-17, revised 1997-05-14