

掺杂型晶纤高温传感头研究*

沈永行 叶林华 童利民 丁祖昌

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

摘 要 提出新型的掺杂型晶体光纤(简称晶纤)高温传感头, 在理论上和实验上就其高温辐射性能作了探讨, 认为其能满足高温环境下接触式测温的要求。

关键词 高温传感, 晶体光纤.

1 引 言

晶体光纤温度传感器中黑体腔的质量非常关键, 它直接影响光纤温度传感器的性能。制作微型光纤黑体腔的方法有多种, 目前常用的是在光纤的表面溅射一层很薄的铂或铱的金属膜^[1], 这种膜热响应性快, 强度较好, 能适应温度不是太高的大部分场合应用。但如经常用在1600°C以上时, 由于金属膜的高温氧化和挥发导致性能的不断劣化。类似于金属膜黑体腔, 目前采用较多的还有陶瓷黑体腔, 其特点是用高温陶瓷涂层来代替金属膜涂层, 抗氧化性甚好, 但存在高温破裂等现象, 应用也受到限制。

本文将提出一种制作微型黑体腔的新方法。众所周知, 所有材料在加热时都将产生热辐射, 辐射的数量取决于材料的温度、发射率以及波长位置。材料的发射率又与材料的吸收密切相关。吸收越大, 发射率也越大^[2]。对一个完全透明的介质, 其发射率就是零。而对一个强吸收的物体, 其发射率可以很大。通常情况下, 高质量的宝石光纤的吸收非常小^[3], 基本上可以忽略。但如通过某种手段使得白宝石光纤的某些部分变成高吸收, 那么这部分光纤将具有大的发射率, 在受热时将产生强的热辐射信号。当掺杂的部分集中于传感光纤尾端时, 它就是一微型辐射传感头。当然它的发射率需要作仔细的分析。

2 理论分析

首先分析涂覆型光纤传感头。对于涂覆型光纤辐射腔, 其热辐射过程可用腔形辐射理论分析, 当涂层长度与光纤直径之比大于10时, 其热辐射就非常接近于黑体辐射, 发射率接近1。但由于镀层与晶纤的结合强度、镀层材料的耐高温与抗氧化性能、应力破损等诸多问题的存在, 使得其应用寿命难以保证。若能使发射体与晶纤有机地结合起来, 成为一体, 则上述的寿命问题便可解决。实现的途径有两种: 1) 对晶纤的表面进行处理, 形成表面层的高发射

* 国家自然科学基金和 863 计划基金资助课题。

收稿日期: 1994年12月3日; 收到修改稿日期: 1995年2月24日

率, 这样其热辐射机制仍为腔形辐射, 发射率大。但目前尚无适当的工艺方法; 2) 通过掺杂的方法, 提高晶纤材料的热发射率, 只要材料的发射率足够大, 观其热辐射也可看作是黑体辐射。本文讨论的正是掺杂型光纤传感头, 由于机制不同, 对其表观发射率需作不同分析。

考虑如图 1 所示的光纤, 其中斜线部分代表掺杂的光纤。按照普朗克黑体辐射理论, 从受热物体表面发射的介于波长 λ_0 到 λ_1 之间的功率密度为^[2]

$$P = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda \quad (w/m^2) \quad (1)$$

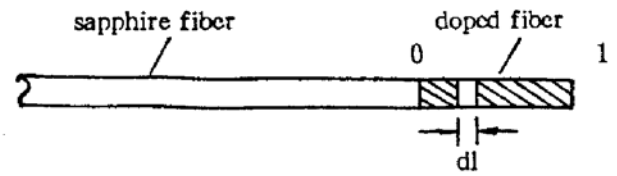


Fig. 1 Sapphire fiber with doped end

式中发射率 ε 为波长 λ 和温度 T 的函数, 且 $C_1 = 3.741 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$, $C_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{ mK}$ 。

如设光纤中掺杂部分的吸收系数为 α , 根据克希霍夫定律, 厚度为 dl' 的薄片的辐射功率密度为 $dP = \alpha W dl'$, 这儿 W 为普朗克函数积分 $\int \frac{C_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda$, 这样长度为 l 的受热区域的总发射功率密度为^[2]

$$P = \int_0^l \alpha W \exp(-\alpha l') dl' = W [1 - \exp(-\alpha l)] \quad (2)$$

按照定义, 总的发射率密度就是普朗克函数积分乘一发射率, 因此根据(2)式可以得到掺杂区的等效发射率

$$\varepsilon = 1 - \exp(-\alpha l) \quad (3)$$

由(3)式发现掺杂光纤头的发射率随掺杂区吸收增加而变大。如吸收系数随波长不同, 其发射率也随之不同。特别是当 $\alpha l \gg 1$ 时, 有 $\varepsilon \simeq 1$, 此时发射率随波长的变化就比较小, 接近于黑体辐射。为了使晶纤掺杂部分具有高发射率, 应选择适当的掺杂材料。根据红外高辐射材料辐射特性及辐射机制的研究结果^[4], 在可见及近红外区, 为实现高发射率, 应利用强辐射带的杂质效应。对 Al_2O_3 晶体, NiO 、 CoO 和 ZrO_2 等均是较好的掺杂材料。资料表明^[5], 纯的 Al_2O_3 晶体在 1200°C 时的发射率约为 0.1, 而掺入少量 NiO 的 Al_2O_3 晶体的发射率就可达到 0.7, 可见, 掺杂对材料发射率的提高影响非常明显。

掺杂材料的选择除考虑发射率外, 应兼顾掺入杂质后晶体的融点和强度。如掺入 Fe_2O_3 材料, 虽然发射率提高很快, 但熔点下降很多, 对实际应用不利。如掺入少量 NiO 和 ZrO_2 时, Al_2O_3 晶体的熔点变化较小。当掺杂体为 Cr_2O_3 时, 熔点还有一定程度的提高, 且材料强度很好, 应用较为理想。

3 实验研究

通过在白宝石晶纤中掺入 Cr_2O_3 , 已经得到了端部强吸收的晶纤。掺杂的过程并不复杂, 首先生长出具有良好品质的白宝石光纤^[3], 并准备好混合有 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 的粉末烧结棒, 然后用聚焦的 CO_2 激光束融化粉末棒, 将白宝石晶纤逐渐浸入熔区, 如图 2 所示。通过控制熔区的尺寸和温度以及光纤浸入的时间, 可以控制掺入离子的浓度。测试表明, Cr_2O_3 的含量可从 10% 到 45%, 最佳浓度应就吸收与强度两者综合考虑, 以 30% 到 40% 为佳。掺杂区的长度为 1~2 mm。

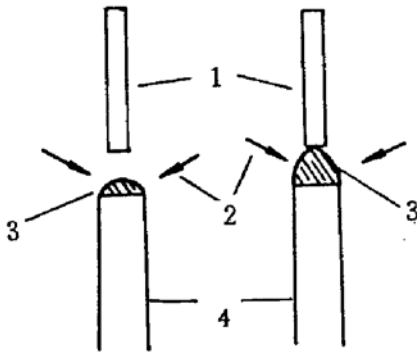


Fig. 2 End doping of the crystal fiber 1; crystal fiber 2; CO₂ laser 3; melling zone 4; sinilered powder rod

根据理论分析,可测量掺杂光纤的吸收以确定掺杂的发射率。限于条件,只对室温下的吸收情况作了测量。测试结果表明,随着掺杂浓度的不同,吸收也相应不同,在 40% 的 Cr₂O₃ 掺杂浓度,吸收相当强,此时在 700~1000 nm 处相应的透射率小于 0.1。图 3 给出了掺杂光纤透射 $\exp(-\alpha l)$ 随波长的变化曲线,并给出了由(3)式得到的发射率 ϵ 的波长变化。

为反映高温工作时晶纤掺杂头的辐射情况,实验测试了在 1200°C 工作的晶纤掺杂头的热辐射光谱。测试结果如图 4 所示。作为比较,图中同时列出了涂覆型晶纤传感头在相同条件下的热辐射光谱。由图中可以看到,二传感头的发射谱形状基本相同,仅在位置上有大约 10 nm 的偏移。考虑到工作温度变化 20 °C 就能产生 10 nm 的波长偏移,可以认为这种偏移是由测试温度变化引起的。如将涂覆型晶纤传感头的热辐射谱作为黑体辐射考虑,那么掺杂型传感头的热辐射谱也就与黑体辐射非常接近,这对信号的处理具有重要意义。

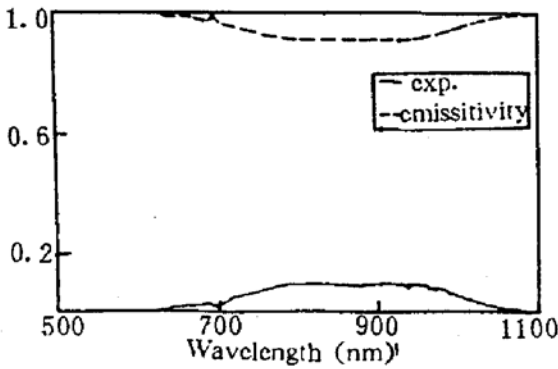


Fig. 3 Absorption of the end doped fiber and its emissivity

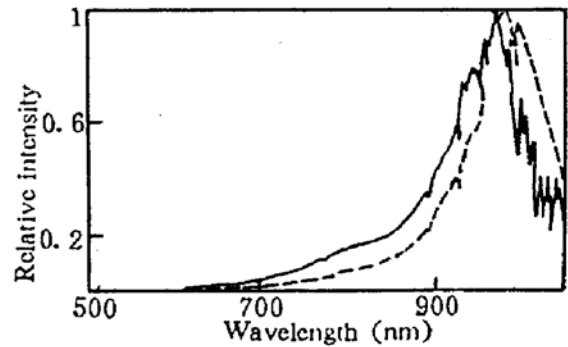


Fig. 4 Thermal radiance spectrum of the doped fiber—doped fiber--coated fiber

根据热发射谱的测试结果,可以认为掺杂型晶纤传感头的波长发射率接近于黑体(或灰体),波长选择性较小。这与光纤吸收测试得到的结果不完全一致,分析其原因可能是高温工作状态的光纤吸收与室温下有较大变化。另一原因就是吸收测量中忽略了反射率的变化,也可能产生一定误差。

通过对不同温度下晶纤辐射功率的测试,发现在 600°C~1200°C 范围,辐射强度随温度的变化与理论值符合较好,如图 5 所示。这表明在该温度范围内,发射率并未发生明显变化。

最后,实验对掺杂型晶纤传感头的热响应作了初步研究。实验系统如图 6 所示,一斩波的 CO₂ 激光束聚焦到传感头上,成为周期性的热信号。通过观察传感头的热辐射信号,可以看出其能否反映热信号的周期性变换。调节斩波频率,发现掺杂型传感头能反映高达 2 kHz 频率的热信号变化。

4 结 论

1) 掺杂型晶体光纤高温传感头能适应高温场合的温度传感应用。理论分析与实验研究均表明,只要掺杂浓度适当,其辐射接近于黑体辐射。

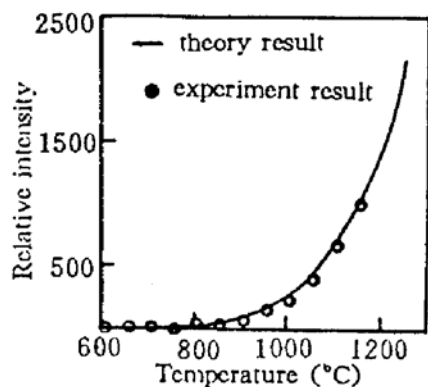


Fig. 5 Radiance signal with the temperature

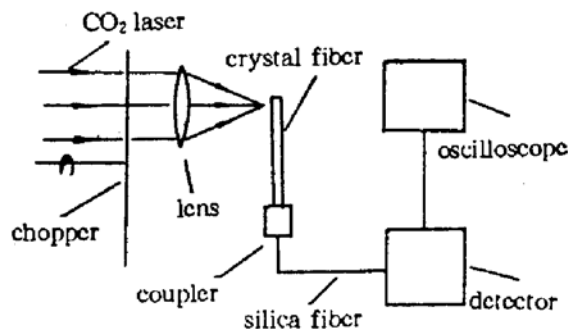


Fig. 6 Setup of heat response frequency measurement

2) 掺杂型传感头的主要优点是其良好的高温强度及耐用性。对 Al_2O_3 晶纤掺杂头，工作温度可以达到 2000°C 。如果采用更高熔点的 ZrO_2 晶纤作为温度传感用，掺杂型传感头将是理想的选择。

3) 掺杂型晶纤传感头同时具有高的空间分辨率和快的时间响应性。

4) 虽然测试表明 1200°C 以下等效发射率变化不大，但不能期望更高温度下保持不变。因此在高温测量时，应采用双色法(或多色法)以消除发射率变化的影响。

5) 掺杂型传感头的掺杂体选择较为重要。不同种类的晶纤材料应选择各自合适的掺杂体。

6) 掺杂型晶纤传感头的制作工艺并不复杂，且性能可靠，工作稳定，可以预期在接触式晶纤高温传感中将起到重要作用。

参 考 文 献

- [1] R. R. Dils, High-temperature optical fiber thermometer. *J. Appl. Phys.*, 1983, 54(3): 1198
- [2] M. Gottlieb, G. B. Brandit, Fiber-optic temperature sensor based on internally generated thermal radiation. *Appl. Opt.*, 1981, 20(19): 3408
- [3] M. M. Fejer, J. L. Nightingale, G. A. Maget *et al.*, Laser-heated miniature pedestal growth apparatus for single-crystal optical fibers. *Rev. Sci. Instrum.*, 1984, 55(11): 1791
- [4] 王宝明, 苏大昭, 张光寅, 红外高辐射材料的辐射特性及辐射机制. *红外研究*, 1983, 2(1): 55
- [5] Y. S. Touloukian D. P. Dewitt, *Thermal Properties of Matter, Vol. 8, Thermal Radiative Properties, Nonmetallic Solids*, 1972, IFI/Plenum Data Corporation, P553

Study on the Doped Crystal Fiber High Temperature Sensor

Shen Yonghang Ye Linhua Tong Limin Ding Zuchang

(Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 3 December 1994; revised 24 February 1995)

Abstract This issue presents a new kind of crystal fiber high temperature sensor. The method of making the mini-blackbody by doping in the fiber end is found effective. Theoretical and experimental study is made on its thermal radiance.

Key words high temperature sensing, crystal fiber.