

从室温到 1800°C 全程测温的蓝宝石单晶 光纤温度传感器*

沈永行

(浙江大学物理系, 杭州 310027)

摘 要 表述了从室温到 1800°C 测温范围的全程测温的蓝宝石单晶光纤温度传感器。该光纤传感器综合了光纤辐射测温技术和光纤荧光测温技术的特点, 利用特殊生长的端部 Cr^{3+} 离子掺杂的蓝宝石单晶光纤, 使两者有机地结合, 实现用单一光纤传感头达到大范围的温度测量。介绍了端部掺杂的蓝宝石单晶光纤的生长方法, 分析了它的荧光温度特性、光纤传感头上荧光信号与热辐射信号的相互干扰以及光纤温度传感器的系统结构和工作原理, 给出了实验结果。

关键词 光纤温度传感器, 蓝宝石单晶光纤, 荧光。

1 引 言

光纤温度传感器具有动态范围大、灵敏度高、响应快、抗电磁干扰等优点, 非常适用于等离子体沉积、高频电加热炉及高温热气流等领域的温度测量。

在各种光纤温度传感器中, 有两类具有特别重要的应用价值: 根据普朗克辐射定律, 利用物体高温热辐射进行检测的辐射型光纤温度传感器^[1]和利用物体荧光寿命与温度对应关系的荧光寿命检测型光纤温度传感器^[2]。由于物体的热辐射随温度的升高呈近指数型增长, 辐射型光纤温度传感器在高温下具有很高的灵敏度, 但无法应用于低温区域。相反, 由于物体的荧光仅在低温区具有可检测的荧光温度特性, 而在高温区则由于荧光淬灭以及辐射背景的增加而无法适用, 因此荧光测温型光纤温度传感器适用于低温区的温度测量。上述两种光纤温度传感器如能有机地结合在一起, 将能实现从低温到高温的大范围温度测量。利用单一光纤探头实现大范围测温具有重要的应用价值。

蓝宝石单晶光纤由于其极好的高温物理化学性能, 非常适用于高温下光纤测温应用, 现已成功地用作辐射型光纤温度传感器的光纤传感头^[1, 3]。利用激光加热基座法(LHPG)单晶光纤生长技术, 通过在蓝宝石单晶光纤的端部掺入 Cr^{3+} 离子^[4], 可以实现光激发下的荧光发射。通过荧光寿命的检测, 可以测量所对应的温度。因此, 这种温度传感器将实现从低温到高温的全程测温。

* 国家自然科学基金(69407004 和 59702007)、国家 863 计划(863-715-011-0070)资助项目。

收稿日期: 1998-10-23; 收到修改稿日期: 1998-12-09

2 系统结构及工作原理

从室温到 1800 °C 全程测温的蓝宝石单晶光纤温度传感器的系统结构框图如图 1 所示，

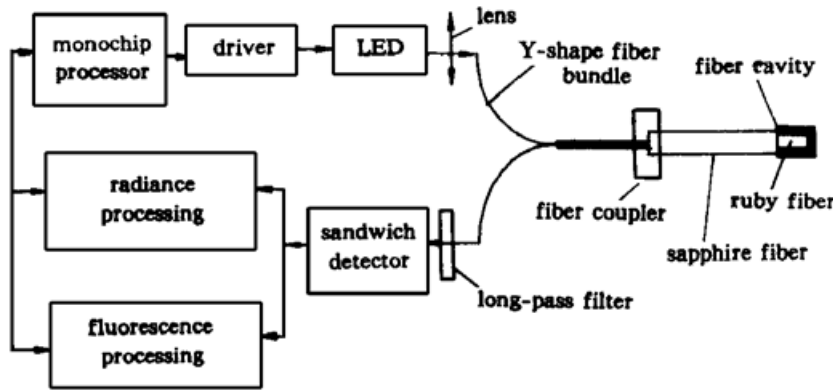


Fig. 1 Diagram of the sapphire fiber thermometer system

系统主要包括端部掺杂的蓝宝石单晶光纤传感头、Y 型石英光纤传导束、超高亮发光二极管(LED) 及驱动电路、光电探测器、荧光信号处理系统^[4]和辐射信号处理系统^[3]。

系统的工作原理为：在低温区(400 °C 以下)，辐射信号较弱，系统开启发光二极管(LED) 使荧光测温系统工作。发光二极管发射调制的激励光，经聚光镜耦合到 Y 型光纤

的分支端，由 Y 型光纤并通过光纤耦合器耦合到蓝宝石光纤温度传感头。光纤传感头端部受激励光激发而发射荧光，荧光信号由蓝宝石光纤导出，并通过光纤耦合器从 Y 型光纤的另一分支端射出，由光电探测器接收。光电探测器输出的光信号经放大后由荧光信号处理系统处理，计算荧光寿命并由此得到所测温度值。而在高温区(400 °C 以上)，辐射信号足够强，辐射测温系统工作，发光二极管关闭。辐射信号通过蓝宝石光纤并通过 Y 型光纤输出，由探测器转换成电信号，系统通过检测辐射信号强度计算得到所测温度。

图 1 中所示的光纤传感头端部由 Cr³⁺ 离子掺杂，实现光激励时的荧光发射。掺杂部分光纤长度为 8~ 10 mm。端部光纤的外表面同时镀覆黑体腔，用于辐射测温。(这时，光纤黑体腔长度与直径之比大于 10，可以满足黑体腔表观辐射率恒定的要求)^[3]。值得注意的是，避免或减少荧光发射部分与热辐射部分的相互干扰，对保证整个系统的性能十分重要。经过分析，可以发现这种干扰主要表现为：1) 荧光信号中辐射背景信号对荧光寿命检测精度的影响，2) 光纤表面镀覆对荧光强度的影响，3) 光纤内 Cr³⁺ 离子掺杂对黑体腔热辐射信号的影响。以下分别加以说明。

首先考虑辐射背景对荧光寿命检测精度的影响。由于热辐射信号强度遵守普朗克定律呈近指数变化，在荧光测温工作的低温区内，辐射背景很小，而且为未加调制的直流信号，相对于周期调制的荧光信号，很容易用滤波电路加以消除。因此其影响可以忽略。

其次，考虑光纤端部表面镀覆对荧光信号强度的影响。光纤内的掺杂离子在受激发时，向空间各方向发出荧光，但只有立体角满足光纤数值孔径的那部分荧光，才能通过光纤表面的全反射由光纤导出。经过分析，可以发现确有部分荧光由于端部表面的镀覆而被吸收，且影响较大(强度降低约 60%)。为保证尽可能大的信噪比，应特意加长端部掺杂光纤长度，使超过镀覆长度 2~ 3 mm，才能有效地消除表面镀覆对荧光强度的影响。

再次，考虑离子掺杂对辐射信号的影响。实际上，由于高温下能带的交叠，离子吸收的影响越来越小，可以忽略离子掺杂对热辐射光谱的影响，这点也已由实验

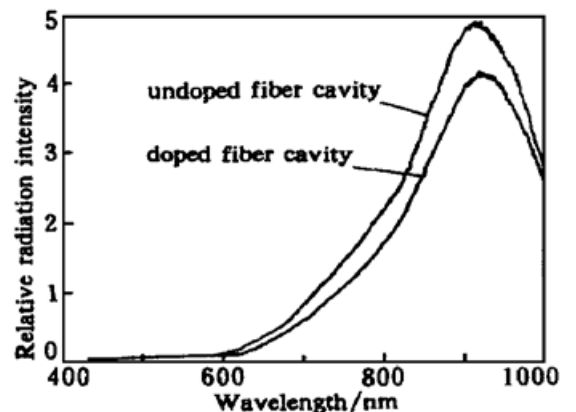


Fig. 2 Radiance spectrum of the fiber cavity

证明。图 2 分别为端部有 Cr^{3+} 离子掺杂和没有离子掺杂的光纤在镀覆黑体腔后在 1000℃ 时的热辐射谱(OMA 采入), 显然图中没有明显的吸收谱段。(由于两光纤测试时的位置略有不同, 使谱高度等也略有不同)。

3 蓝宝石光纤传感头制作及荧光光学特性

蓝宝石单晶光纤传感头由激光加热基座法生长制作^[4, 5]。首先生长一直径约 1 mm、足够长度的纯氧化铝单晶光纤。然后以该光纤为子晶, 以一直径 2 mm 的红宝石单晶作为原棒, 通过仔细调节激光功率和生长速度, 可以生长出结合良好、端部掺杂的氧化铝单晶光纤。掺杂部分 Cr^{3+} 的原子比约为 0.05%。图 3 为掺杂光纤的生长示意图。

对端部掺杂的蓝宝石单晶光纤的透射谱和荧光谱分别进行了测试。图 4 为 450~750 nm 波段内的光纤透射谱, 从中可以明显看到 550 nm 波段的吸收区。图 5 为利用光学多通道分析仪(OMA)测得的 694 nm 附近的荧光谱, 图中同时示出了其在 20℃ 和 380℃ 温度的荧光谱, 其结果与大块红宝石晶体的荧光谱相一致。

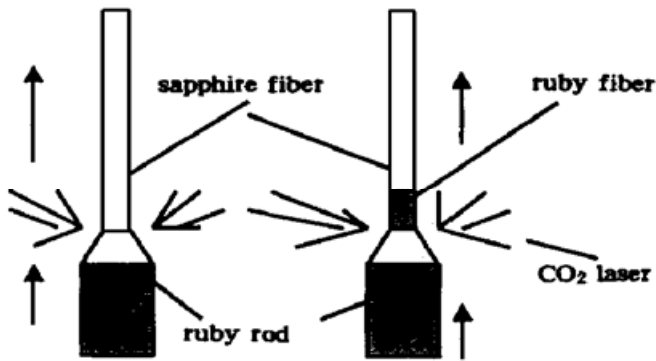


Fig. 3 Growth of the end doped sapphire fiber

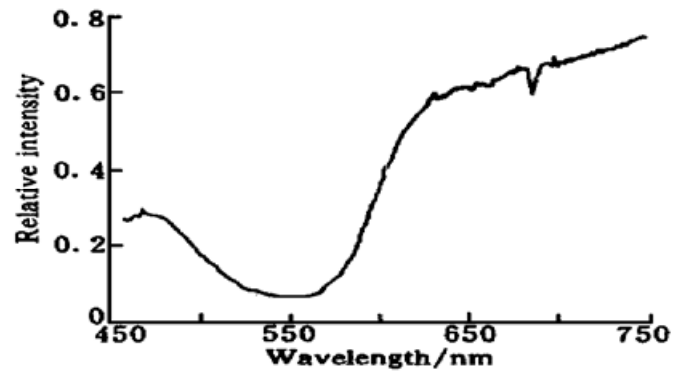


Fig. 4 Absorption spectrum of the end doped sapphire fiber

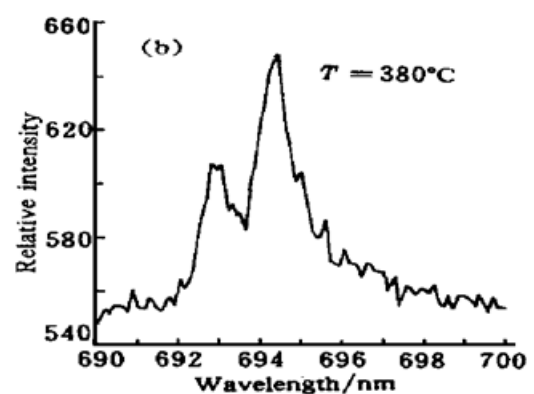
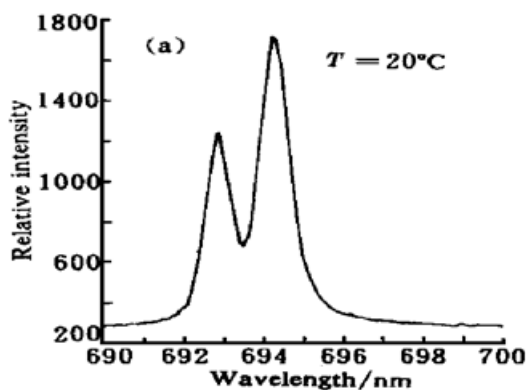


Fig. 5 Fluorescence spectra of end doped sapphire fiber. (a) $T = 20^\circ\text{C}$, (b) $T = 38^\circ\text{C}$

利用自行研制的处理电路^[4]对蓝宝石单晶光纤的荧光寿命与温度关系进行了系统测试, 测试结果如图 6 所示。由图中可以看到荧光寿命随温度呈单调下降形状, 但不同温区的斜率有所不同。此外, 利用示波器对荧光强度的温度关系进行了系统测试, 结果见图 7 所示, 图中两组曲线分别为探测器前加干涉滤光片和长波长滤光片(670 nm)时的荧光强度-温度关系, 可以认为, 仅从强度考虑, 长波长滤光片更为适用。

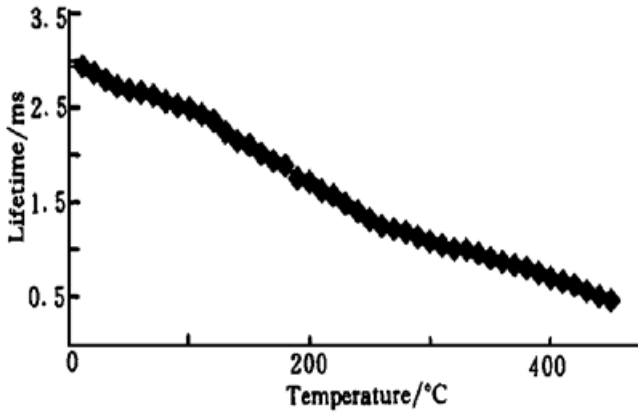


Fig. 6 Temperature dependence of fluorescent lifetime

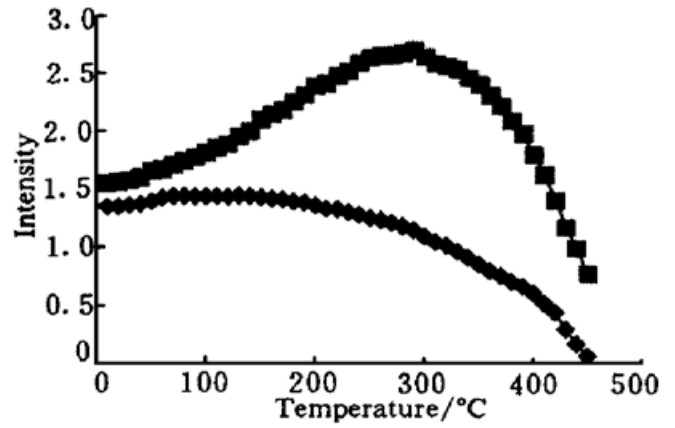


Fig. 7 Temperature dependence of the fluorescence intensity. \blacklozenge : interference filter; \blacksquare : long pass filter

4 测温系统实验结果及分析

采用图 1 所示测温系统得到的实验测试结果如图 8 所示，该曲线可以作为系统标定用。

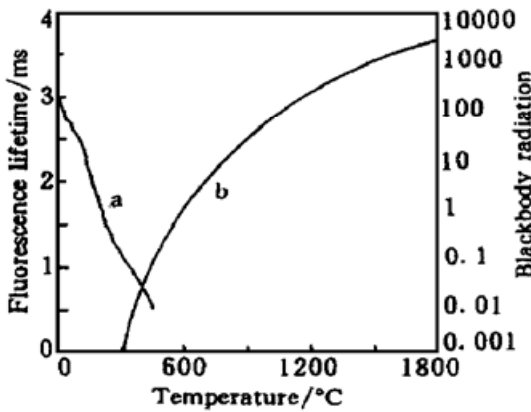


Fig. 8 Calibration graph of the fluorescence lifetime and blackbody radiation. a: fluorescence lifetime; b: blackbody radiation

可以看到在 300~ 450°C 区间存在较大的重叠区，这对系统的连续测温及参照标定非常关键(因为荧光测温与信号强度无关，光信号传输过程的变化如耦合变化等不影响其温度测试值，因此能用来标定辐射测温值)。1600 nm 波段探测器的采用对降低辐射测温系统的测温下限从而使其测温区间与荧光测温区间部分相重叠非常重要。为方便起见，系统采用了一对波长探测器(包括 Si 和 InAsGa 探测器)，其中心波长分别为 900 nm 和 1600 nm，能有效探测 700 nm 附近的荧光和长波段的热辐射光。

系统的测温分辨力在低温区由荧光寿命的测试分辨力决定。 Cr^{3+} 掺杂的氧化铝光纤端部的荧光寿命从

20°C 的 3 ms 单调缩短到 450°C 的 0.5 ms，因此其平均温度分辨力是 0.2°C/ μs 。受系统信噪比的影响，目前测试系统对荧光寿命的实际分辨力为 5 μs ，相对应的温度分辨力为 1°C。

在 400°C 以上的高温区，测温分辨力由辐射信号的信噪比和 A/D 转换器的分辨力决定。目前在 400°C 到 600°C 区间，受信噪比影响，分辨力为 1°C，而在 600°C 以上范围，信号很强，信噪比足够大，在不考虑长期稳定性的情况下，较容易地达到 0.1°C 的测温分辨力。

结 论 用激光加热基座法生长出的端部 Cr^{3+} 离子掺杂的氧化铝单晶光纤，已成功地用于从室温到 1800°C 的大范围光纤温度传感器。对光纤的吸收与荧光光学特性的测试表明，该光纤具有较好的光学品质。

通过把荧光测温机制和辐射测温机制相结合，已制作成功从室温到 1800°C 的蓝宝石光纤温度传感器实验系统，其中荧光测温的温度范围为 20~ 450°C，辐射测温的温度范围为 300~ 1800°C。其中 300~ 450°C 间较大的测温重叠区，有利于连续测温 and 参照标定。测温系统的分

辨力为: 20~ 600°C, 1°C; 600~ 1600 °C, 0.1°C。

由于噪声的影响, 目前荧光测温系统的测温分辨力受到一定限制, 使整个系统低温区的测温分辨力受到影响。若采用相敏检测技术, 同时采用更强的激光二极管激发源、改进光纤系统的耦合, 可以期望系统的低温分辨力获得较大改进。

参 考 文 献

- [1] Dils R R. High-temperature optical fiber thermometer. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(3) : 1198~ 1200
- [2] Sholes R R, Small J G. Fluorescent decay thermometer with biological applications. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, **51**(7) : 882~ 884
- [3] 叶林华, 沈永行. 蓝宝石单晶光纤高温仪的研制. *红外与毫米波学报*, 1997, **16**(6) : 437~ 441
- [4] Shen Yonghang, Wang Yanqi, Tong Limin *et al.*. Novel sapphire fiber thermometer using fluorescent decay. *Sensors and Actuators (A) Physical*, 1998, **71**(1, 2) : 70~ 73
- [5] Shen Yonghang, Xu Ronghui. Development of a compact sapphire fiber thermometer probe using fluorescent decay. *Fiber Optic Sensors V, Proc. SPIE*, 1996, **2895** : 144~ 150

Sapphire Fiber Thermometer Ranging from the Room Temperature to 1800°C*

Shen Yonghang

(Zhejiang University, Department of Physics, Hangzhou 310027)

(Received 23 October 1998; revised 09 December 1998)

Abstracts The sapphire fiber thermometer ranging from the room temperature to 1800°C is described. It uses a specially grown sapphire fiber as the thermometer probe. The end part of the sapphire fiber is doped with Cr³⁺ ion by means of the laser heat pedestal growth (LHPG) method and coated with some high radiant material to constitute a mini fiber cavity. Techniques of fluorescent lifetime detection and the radiance intensity detection were used. Growth of the end doped sapphire fiber is introduced. Analysis is made on the temperature dependence of fluorescence of the end doped sapphire fiber as well as the signal interference between the fluorescence and the thermal radiance. Experimental system of the thermometer and the preliminary experimental result are presented.

Key words fiber thermometer, sapphire fiber, fluorescence.

* Supported by National Natural Science Foundation of China (Project No. 69407004 and 59702007) and National Advanced Materials Committee of China (Project No. 863-715-011-0070).