

钕玻璃的温敏特性及光纤温度传感器

杨瀛海 俞本立

(安徽大学 物理系, 合肥)

提 要

本文从理论上通过对钕玻璃中 Nd^{3+} 离子光吸收特性的分析, 阐明了其光吸收对温度依从性的原因。在实验中, 试制了几种不同类型的钕玻璃光纤温度传感探头。对 Nd^{3+} 离子光吸收的温度特性进行了验证, 其结果和理论分析相一致, 实验表明钕玻璃是一种性能良好的光纤温敏传感材料。

关键词: 钕玻璃; 光纤温度传感器。

一、引 言

温度是很常见很重要的物理量, 在许多特殊的环境中, 如高电压、强核辐射、易燃易爆等环境及在生物体内, 传统的温度传感器很难进行有效的实时监测。由于光纤本身具有众所周知的优异性能, 而使得光纤温度传感器成为人们极为感兴趣的课题, 已见报道有干涉型光纤温度传感器^[1], 热色转换效应及稀土元素荧光衰减光纤温度传感器^[2,3]等, 较早推出的是一种半导体温度传感器^[4]。

本文所讨论的是钕玻璃光纤温度传感器的原理及实验。这里讲的钕玻璃即是一般作为激光材料的钕玻璃, 目前它作为激光材料已经很成熟, 许多文献对其特性有详细的论述。

钕玻璃的吸收光谱是由一些显著增宽的带组成。吸收光谱这个特点是其玻璃基质的结构决定的, 而 Nd^{3+} 离子光谱能级主要由其本身的自旋与轨道作用决定。在玻璃配位场的作用下 Nd^{3+} 离子能级分裂为 $J + \frac{1}{2}$ 个子能级, 然而配位场的作用较前者是次要的, 因而在相近的玻璃基质中 Nd^{3+} 离子吸收峰位置变化很小, 而吸收峰的分裂和吸收截面的大小会略有不同。

二、理 论 分 析

现设一束入射光 $I_0(\nu)$, 照射到光学长度为 l , 光吸收系数为 $\alpha(\nu, T)$ 的钕玻璃上, 如果忽略菲涅耳反射损失(因这仅是一个附加的常数), 且用响应系数为 $f(\nu)$ 的光电管来接收, 则光电探测器的输出为:

$$P = \int I_0(\nu) \exp[-\alpha(\nu, T)l] f(\nu) d\nu. \quad (1)$$

根据光跃迁吸收理论, 吸收系数可表达为:

$$\alpha(\nu, T) = \sum_{jk} \alpha_{jk}(\nu, T) = \sum_{jk} N_j(T) \sigma_{jk}(\nu). \quad (2)$$

上式中 $\sigma_{jk}(\nu)$ 是离子由能级 j 跃迁到能级 k 上的吸收截面。 $N_j(T)$ 是能级 j 上的离子数，它是满足玻耳兹曼粒子分布规律的，有

$$N_j(T) = \frac{N_0 g_j \exp[-E_j/KT]}{\sum_i g_i \exp[-E_i/KT]}. \quad (3)$$

显然 $N_j(T)$ 是温度的函数，这里 N_0 为 Nd^{3+} 离子的含量， g_i 为能级的简并度， E_i 为能级的能量值。其中吸收截面和峰值吸收截面的关系为：

$$\sigma_{jk}(\nu) = \sigma_0(\nu_{jk}) \exp[-(\nu - \nu_{jk})^2/B^2]. \quad (4)$$

式中 $\sigma_0(\nu_{jk})$ 为 $j-k$ 跃迁的峰值吸收截面，并有

$$B = \Delta\nu/2 \sqrt{\ln 2}. \quad (5)$$

利用上面几个式子，可以将(1)式改写为：

$$P = \int I_0(\nu) \exp\{-\sum_{jk} N_j(T) \sigma_0(\nu_{jk}) \exp[-(\nu - \nu_{jk})^2/B^2] l\} f(\nu) d\nu. \quad (6)$$

已有的理论和实验证明，玻璃网络的热振动对辐射跃迁的影响是二次微扰，温度的升高和降低不会改变吸收峰的位置，也不会改变吸收峰的大小。所以不妨认为上式中的 $\sigma_0(\nu_{jk})$ 及 B 在不同的温度下是常量^[5~7]。这样，由(6)式可以看出，透射光功率仅受 $N_j(T)$ 的调制，即跃迁时低能级中各子能级上的粒子数分布随温度变化调制了出射光强度。所以钽玻璃中 Nd^{3+} 离子光吸收温度依从性是玻耳兹曼粒子分布规律约束的结果。

利用(6)式对钽玻璃光吸收的温敏特性进行了数值计算，在计算中所用样品的长度为 50 mm， Nd^{3+} 离子的含量为 $(7.8 \pm 1.5) \times 10^{20}$ 个/cm³，能级及跃迁参数参考文献[5]。计算结果如图 1 所示，表明 ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$ 吸收光谱随温度变化的情况。显然，吸收带的短波方向光吸收强度随温度升高而减少。而在吸收带的另一边光吸收强度随温度升高而增加。其原因是由于吸收带的短波方向光谱主要来自于 ${}^4I_{9/2}$ 中 (a)， (b) 两个子能级向上的跃迁吸收，

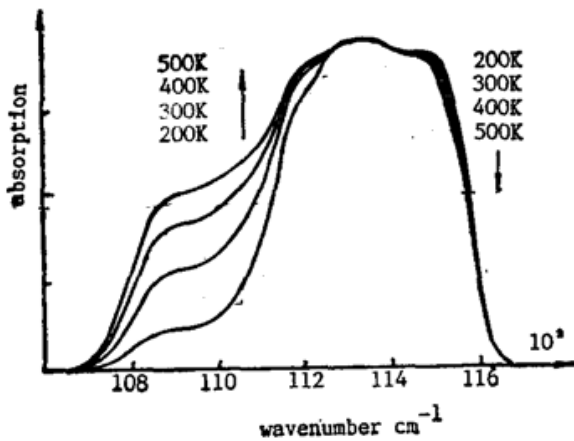


Fig. 1 Absorption spectra of ${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$ at different temperature

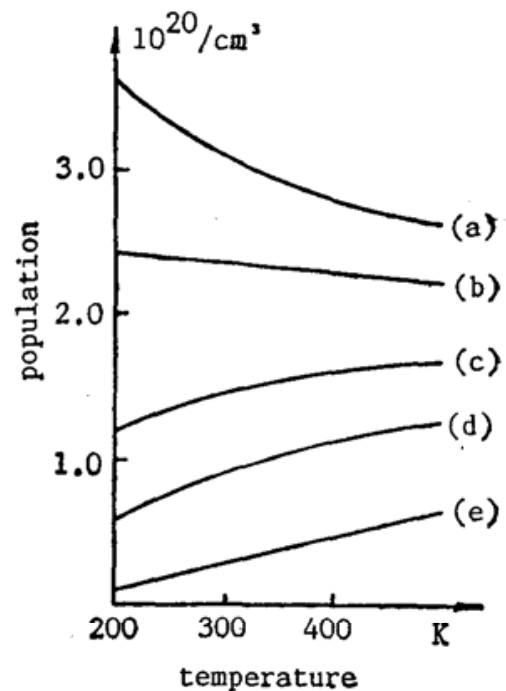


Fig. 2 The Boltzmann distribution of population for ${}^4I_{9/2}$

而(a)、(b)两个子能级上的粒子数在 200 K~500 K 温区中是呈下降趋势, 所以根据(6)式光吸收强度也要随着粒子数的减少而减少。同样, 由于吸收带长波方向的吸收光谱主要是 ${}^4I_{9/2}$ 中(c)、(d)、(e)三个子能级向上跃迁时的包络线, 而这三个子能级上的粒子数在 200 K~500 K 的温区中和温度成正比, 故光吸收强度亦要随之增加, 我们的计算结果和 E. Snitzer 等人的实验现象相吻合^[8]。 ${}^4I_{9/2}$ 中粒子分布随温度的变化如图 2 所示。

由图 1 可以看出, 吸收光谱带的峰值和谷值处温度变化的灵敏度很低, 而吸收带两边半峰值附近的灵敏度较高。此外, 通过(6)式可以看出: 选取高掺杂浓度的材料(N_0 大); 选取吸收较强的带 $[\sigma_0(\nu_{jk})$ 大]及高灵敏的光电探测器 $[f(\nu)$ 大]对于提高系统的灵敏度都是很有益的。

三、实 验

实验装置如图 3 所示, 有探头, 光源驱动器, 光纤传输回路, 光电探测器及电端机。电端机包括放大器, 除法器, 单片机和打印显示等部分。

因为钕玻璃光纤温度传感器是基于 Nd^{3+} 离子光吸收温度依从性这一原理, 也就是通过对光强的测量来确定探头处的温度。然而探头结构的热稳定性, 光源的波动和老化及外界干扰造成的影响等均会引起附加的光强度变化。为了减小误差, 提高系统的准确度, 有人采用双波长^[4], 双光路^[9]等措施, 本文采用双波长的方法。

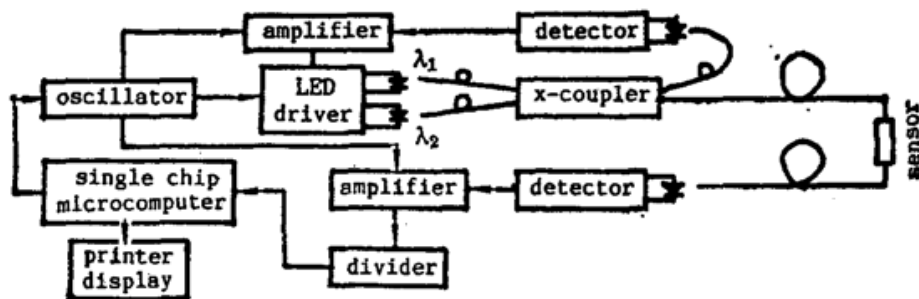


Fig. 3 Schematic diagram of optical fibre temperature sensor system

我们选取光源 λ_1 是中心波长为 $0.8204 \mu\text{m}$ 的超荧光辐射激光二极管 LD, 带宽 $\Delta\lambda = 19 \text{ \AA}$ 。中心波长落在 ${}^4I_{9/2} - {}^4F_{5/2}, {}^2H_{9/2}$, 这个吸收带的长波长方向的半峰值处, 根据前面的理论分析, 此处的温度变化灵敏度较高, 将它用做信号光源。参考光源 λ_2 选取中心波长 $\lambda_2 = 0.87 \mu\text{m}$, 带宽 $\Delta\lambda_2 = 360 \text{ \AA}$ 的 LED 发光二极管。这两个波长的光经过 X 型耦合器后, 一路不经过探头, 直接反馈, 用来控制 LD 和 LED 的稳定。另一路经过探头到达探测电端机, 两个波长的信号相除, 滤除了探头形变等因素, 经单片机处理后, 将温度变化信号显示打印。

研制本光纤传感器的目的是要将它用于高压电器的温升监测。因此, 要求探头具有绝缘性能好, 体积小, 响应快等特性, 还要求探头易于安装, 不能影响高压电器的原有工艺等。鉴于上述要求, 实验中试制了几种不同类型的全玻璃结构的探头。探头所用的温敏材料为 03 型掺钕硅酸盐玻璃。探头主要有以下两种结构: 第一种是耦合波导探头, 其结构是钕玻璃丝与石英毛细管构成波导, 与光纤耦合。端面冷加工要求高, 而且几种材料的内外径必须

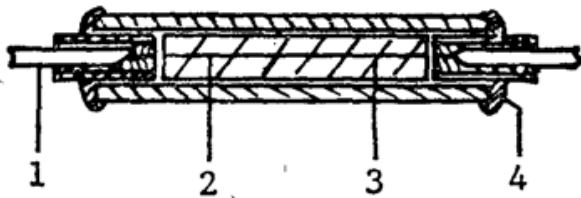


Fig. 4 Waveguided probe

1: optical fibre; 2: Nd³⁺ doped glass core; 3: quartz tube; 4: epoxy
 Sizes: probe length 80mm, diameter 3 mm
 Nd³⁺ doped glass core length 50 mm, diameter 0.25 mm

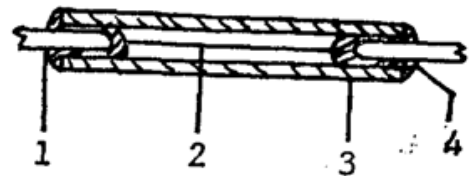


Fig. 5 Fused probe

1: optical fibre; 2: Nd³⁺ doped glass core; 3: quartz tube; 4: epoxy
 Sizes: probe length 75 mm, diameter 3 mm
 Nd³⁺ doped glass core length 40 mm, diameter 0.12 mm

严格挑选,才能较好的对准耦合,如图4。第二种探头是熔接型探头,它是将一根与光纤外径相近的钕玻璃丝,熔接在两根光纤之间,并将它们固定在一根石英管内,钕玻璃丝与空气形成波导,见图5。这样做大大降低了探头的耦合损耗和耦合的困难。我们对钕玻璃和光纤的软化点和膨胀系数进行了对比和分析,从工艺上保证熔接点处不断裂,可长期使用。

用以上两种探头所做的温度实测曲线见图6,灵敏度高的曲线是用LD做出的结果。灵敏度低的曲线是用LED做出的结果,灵敏度降低是由于LED光谱宽度较宽,进入峰值的下降沿。显然和前面的理论分析相一致。

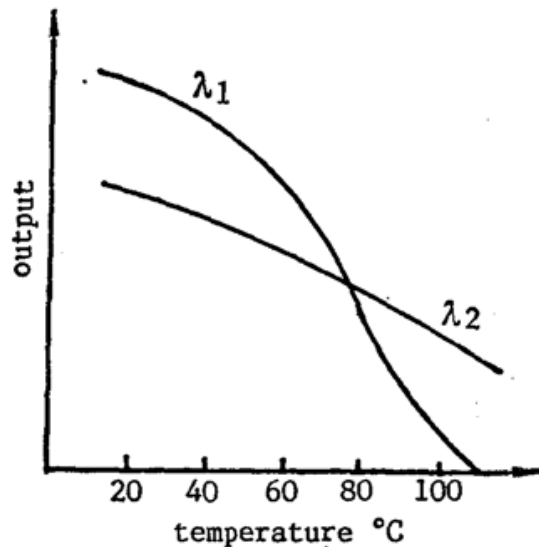


Fig. 6 Experimental graph with different light sources $\lambda_1=0.8204\mu\text{m}$, $\Delta\lambda_1=19\text{ \AA}$, $\lambda_2=0.87\mu\text{m}$, $\Delta\lambda_2=360\text{ \AA}$

四、结果和讨论

用以上钕玻璃探头进行了温升实测,在 $-30^\circ\text{C}\sim 150^\circ\text{C}$ 的范围内,测试精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。测量范围主要受光纤包层和粘接剂的限制。

钕玻璃和其它温敏材料如GaAs, PIn相比价格便宜,容易加工处理,从而探头易于制作。所以钕玻璃是一种很好的温敏材料并可构成光纤传感系统。

参 考 文 献

- [1] S. C. Rashleigh; *IEEE J. Q. E.*; 1982, **QE-18**, No. 4 (Apr), 626.
[2] M. Brenci *et al.*; «*Conference Proceedings, OFS'84*», (Liederhalle Stuttgart, FRG, Vde-VERLAG GmbH, Berlin Offenbach), 155.
[3] K. T. V. Grattan *et al.*; *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, **56**, No. 9 (Sep), 1784.
[4] K. Kyuma; *IEEE J. Q. E.*, 1982, **QE-18**, No. 4(Apr), 676.
[5] M. M. Maun, L. G. Deshazer; *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, No. 7 (Jun), 2951.
[6] W. 克希奈尔, (华光译); «*固体激光工程*», (科学出版社, 北京, 1983), 66.
[7] 陈述春; «*物理学报*», 1980, **29**, No.1 (Jan), 54.
[8] 同[2], 79.
[9] JSJ. Lammerink *et al.*; *J. Phys. (E): Scient. Instrum.*, 1984, **17**, No. 12 (Dec), 1127.

The properties of Nd^{3+} doped glass temperature and optical fibre temperature sensor

YANG YINGHAI AND YU BENLI

(*Laboratory of Optical Fibre, Anhui University, Hefei*)

(Received 15 May 1989; revised 23 June 1989)

Abstract

The absorption of Nd^{3+} doped glass is analysed on theory and indicates the reason of temperature dependent absorption of Nd^{3+} . In experiment, the several kinds of probe with Nd^{3+} doped glass core are made. The experimental results agree with theory analysis. The results demonstrate that Nd^{3+} doped glass is one of superior temperature sensing material.

Key words: Nd^{3+} doped glass; optical fibre sensor.