

# 吸收式光纤温度传感器的研究

段萌萌 陈长乐 雷松鹤 雷晓梅

(西北工业大学理学院, 西安 710072)

**摘要** 提出了一种利用半导体光吸收谱随温度变化原理设计的半导体吸收式光纤温度传感器. 该传感器用 GaAs 晶片作为温度敏感元件, 以光纤作为传光介质, 发光二极管作为光源, 光电管作为光电转换器件. 利用双光束补偿原理, 消除了由于光源不稳定产生的干扰. 研制出的光纤传感器具有体积小, 结构简单, 抗电磁干扰, 灵敏度高等优点. 实验表明: 该传感器在  $-20^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$  温度范围内可以达到  $0.1^{\circ}\text{C}$  的准确度, 可以实现强电磁干扰下的高空飞行器内环境温度的测量. 为进一步实现光传飞控系统温度测控奠定了基础.

**关键词** 半导体; 温度传感器; 灵敏度

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

## 0 引言

自从 1970 年美国第一次成功地研制成传输损耗为 20 dB/km 的石英质玻璃光纤以来, 光纤技术在光纤传感器等领域已得到了成功的运用. 光纤温度传感器是近几年发展起来的新技术, 也是工业应用中使用的最多的光纤传感器之一. 在光纤温度传感器研制方面, 国外已走出实验室, 国内许多大学和研制单位也研制出了各种光纤温度传感器. 我国在光纤传感器<sup>[1]</sup>的新产品研究开发方面取得了可喜的成绩, 例如在高温传感器和光纤光栅传感器方面获得了重大突破, 特别是高温传感器处于较先进的水平.

本文从传感器和半导体材料的原理出发, 对半导体吸收式<sup>[2]</sup>光纤温度传感器的原理和系统进行了较详细的研究, 分析了该传感器的光源与光探测器的选择依据, 对半导体探头光吸收特性进行了理论分析, 制作出了一种以螺纹固定光纤的新型活动连接探头, 给出了这种传感器的设计原则.

## 1 基本原理

半导体吸收式光纤温度传感器的基本原理是其吸收限随温度的频移. 半导体中电子的能带结构是: 几乎充满电子的价带与几乎全空的导带被一禁带分隔. 如果光子被发射并通过半导体时, 光子的吸收概率取决于其本身能量与禁带宽度之比. 对波长大于一定值的入射光, 其光子能量不足以使电子跨越禁带, 因此几乎不产生吸收; 而对于波长较短的入射光, 每个光子所具有的能量都足以把价带上的电子激发到导带, 因此光子的能量发生迁移.

将电子从价带激发到导带引起的吸收称为本征

吸收, 发生本征吸收的条件是电子从价带到导带的跃迁光子能量必须大于半导体禁带宽度, 即

$$h\nu \geq h\nu_g = E_g \quad (1)$$

式中  $h$  为普朗克常量;  $\nu$  为频率;  $E_g$  为半导体的禁带宽度.  $h\nu_g$  是能引起本征吸收的最低限度光子能量.

从式(1)可以看出, 本征吸收光谱在低频方面必须处在一个频率界限  $\nu_g$ , 当频率低于此频率时不可能发生本征吸收, 波长与频率的关系为

$$\lambda = c/\nu \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $\nu$  为频率,  $c$  为光速. 而禁带宽度与温度的数学模型<sup>[3]</sup>可以表示为

$$E_g(t) = E_g(0) - \alpha t^2 / (t + \beta) \quad (3)$$

式中  $E_g(0)$  为温度为 0K 的禁带能量, 单位为 eV,  $\alpha$  为经验常量,  $\beta$  为经验常量. 对 GaAs 晶体来说,  $E_g(0) = 5.522 \text{ eV}$ ,  $\alpha = 5.8 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ,  $\beta = 300 \text{ K}$ . 禁带宽度随温度变化, 作为波长函数的吸收曲线将作相应移动, 其移动速度约为  $3 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ . 频率  $\nu_g$  对应的波长  $\lambda_g$  为本征吸收波长. 透射率曲线最陡的线性部分的起点对应的波长为  $\lambda_i$ , 它与禁带宽度的关系为

$$\lambda_i = hc/E_g \quad (4)$$

由式(3), 温度升高, 禁带宽度近似线性减小, 根据式(4), 禁带宽度减小, 则波长向长波方向移动. 故此可以利用波长与温度之间的关系进行温度测量.

半导体吸收式温度传感器<sup>[4]</sup>是利用半导体材料的吸收光谱随温度变化的特性实现的. 当温度变化时, 透过半导体材料的光强将发生变化, 输出电压也将发生变化. 只要检测出输出电压的大小, 即可得出对应的温度量, 从而求出被测温度.

## 2 原理性实验

对半导体吸收光强与温度的关系进行了测试,

如图 1. 实验条件为: 室温  $20^{\circ}\text{C}$ 、大气压  $0.1\text{ MPa}$ ; 发光二极管<sup>[5]</sup> (SE1470) 串联电阻  $0.52\text{ k}\Omega$ ; 半导体片为 GaAs<sup>[6]</sup> 晶片; 光电管<sup>[7]</sup> (SD1440) 下拉电阻  $10\text{ k}\Omega$ .

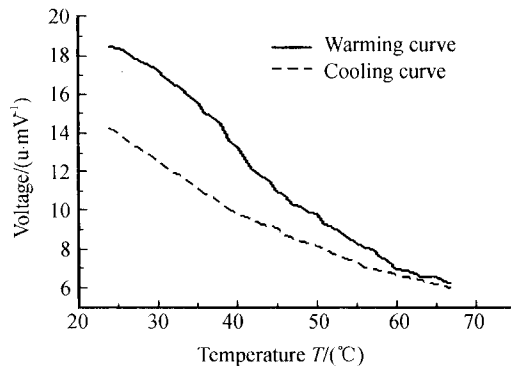


图 1 半导体吸收光强与温度的关系  
Fig. 1 Relation between absorptive intensity and temperature of semiconductor

通过验证可以看出, 半导体吸收光强与温度的明确关系: 随着温度的升高, 半导体片对光强的吸收逐渐增大, 即透过半导体片的光强减弱. 这与理论分析是吻合的.

在实验验证中, 采用电吹风进行加热, 系统受到振动影响过大, 并且温度变化不均匀, 导致实验数据重复性和稳定性较差.

### 3 实验过程

根据所测量的温度范围要求, 选用 SE1470 (AlGaAs 红外发光管) 作为信号光源<sup>[8]</sup>; 对应于光源, 选用 SD1440 (矽光电二极管) 作为光电转换器件; 经过多次试验, 考虑到本文所研制的传感器的实际测温范围, 自行研制了一种以螺丝固定光纤<sup>[9]</sup> 的新型活动连接式探头<sup>[10]</sup>. 其结构如图 2.

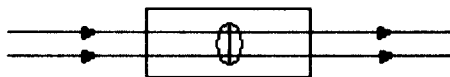


图 2 温度探头结构  
Fig. 2 Structure of temperature probe

该探头用螺丝来固定, 消除了因温度过高引起的粘合剂性能减弱而导致光纤松动所产生的误差, 提高了系统准确度.

加热时, 采用导热材料传热的方法, 把温度探头与导热材料的一端固定起来, 导热材料的另一端与可迅速升温的加热器连接起来. 这样, 系统在稳定状态下升温, 并且由于温度探头未与加热器直接接触, 不会出现温度迅速升高的现象, 温度变化比较均匀.

#### 3.1 补偿系统

半导体光吸收式温度传感器是根据光强变化来测量温度的. 因此, 光源、光纤、光纤连接及光探测器等引起的光强变化是该传感器误差的主要来源.

为了减小测量误差, 一般采用双波长补偿法<sup>[11]</sup> 或双光路补偿法<sup>[12]</sup> 对之进行消除.

本文采用双光束补偿法进行了误差的消除, 系统框图见图 3, 信号光源采用中心波长为  $0.88\ \mu\text{m}$  的 LED 光源, 参考光源亦采用中心波长为  $0.88\ \mu\text{m}$  的 LED 光源, 两者同时发光, 输出信号的变化完全是信号光在传感光路因温度变化而引起的.

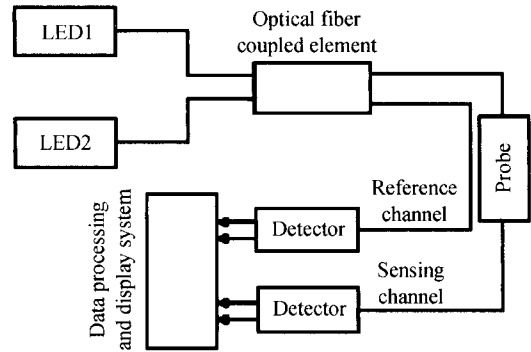


图 3 双波长补偿法  
Fig. 3 Block diagram of dual wavelength

#### 3.2 实验测试系统

用 GaAs 半导体晶片和光纤光路系统配合作为测量温度的传感器系统示意图如图 4. 输入光纤和输出光纤运用自制的温度探头固定, 探头内部留有一定的余地, 放置一片厚为  $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ , 面积为  $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  的 GaAs 晶片在输入和输出光纤之间. 发射光源用 SE1470 (AlGaAs 红外发光管) 发光二极管, 其发射光谱的峰值对应于 GaAs 的吸收波长  $\lambda_g$ . 在传感光路中, 当发光二极管以恒流源推动, 恒功率发光, 通过输入光导纤维照射到 GaAs 上, 透射光的强度将受到温度的调制, 透射光强同样由导光束传输到接收光电二极管上并转换成电信号输出, 这样就能够测量温度了.

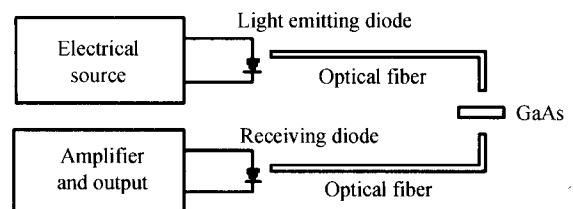


图 4 半导体吸收式光纤温度传感器系统  
Fig. 4 System of semiconductor absorption fiber-optic temperature sensor

这里要注意的是, 在用活动连接式探头固定输入和输出光纤时, 必须使两根光纤的中轴线和探头的中轴线重合, 两根光纤的端面相互重合, 并且半导体片的大小一定要能完全接收到来自输入光纤的光.

#### 3.3 实验及结果分析

实验所得曲线如图 5, 图中  $U_1$  为传感光路的输出电压,  $U_2$  为参考光路的输出电压. 图中显示了温

度与传感器输出值之间的关系. 由图 5 可知, 该光纤传感器对温度有较好的响应, 随温度的降低输出光强度增强, 随温度的升高输出光强度减弱. 这与半导体的理论分析相吻合. 升温曲线和降温曲线基本重合, 然而相同温度时, 降温曲线略低于升温曲线. 由于本文用的温度计响应时间较长, 温度达到一个稳定值时需要一定时间. 升温时, 传感器输出信号比温度计显示值高; 降温时, 传感器输出信号比温度计显示值低. 总体来说, 该传感器重复性较好.

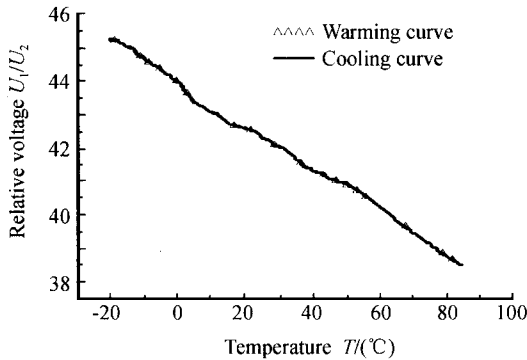


图 5 温度对相对光强的影响

Fig. 5 Relation between temperature and relative intensity

## 4 结论

本文从半导体吸收光谱原理出发, 对半导体吸收式光纤温度传感器进行了较系统的研究和设计. 通过测试, 该传感器在  $-20^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$  温度范围内可以达到  $0.1^{\circ}\text{C}$  的准确度. 但是还有一些需要改进的地方. 首先, 要解决温度标定问题, 尽管每次测试的曲线形状一致性很好, 但是, 存在温度起点漂移不稳定的问题. 其次, 传感器的准确度受耦合条件, 发光管, 接收管的选择和本征材料制备工艺因素影响, 要使该传感器投入使用, 还需做进一步的改进.

### 参考文献

- 王化祥, 张淑英. 传感器原理及应用. 天津: 天津大学出版社, 1988. 327~331  
Wang H X, Zhang S Y. Principle and Application of Sensing Device. Tianjin: Tianjin University Press, 1988. 327~331
- 陈国平, 姜志茹, 夏荣民, 等. 一种检测十二指肠胃反流光纤传感器的研制. 光子学报, 2004, **33**(1): 31~34  
Chen G P, Jiang Z R, Xia R M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 31~34
- 曹康敏, 施明恒. 半导体吸收式光纤温度传感器的研制. 传感技术学报, 1999, **12**(1): 57~63  
Cao K M, Shi M H. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 1999, **12**(1): 57~63
- 张志鹏. 光纤传感器原理. 北京: 中国计量出版社, 1991. 176  
Zhang Z P. Principle of Optical Fiber Transducer. Beijing: China Measurement Press, 1991. 176
- 李炳乾, 布良基, 甘雄文. LED 正向压降随温度的变化关系研究. 光子学报, 2003, **32**(11): 1349~1351  
Li B Q, Bu L J, Gan X W. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1349~1351
- 常丹华, 王延云. 谱带吸收式光纤温度传感器. 光子学报, 2001, **30**(7): 885~888  
Chang D H, Wang Y Y. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7): 885~888
- 达争尚, 陈良益. 光电系统的匹配设计. 光子学报, 2003, **32**(6): 669~671  
Da Z S, Chen L Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 669~671
- 赵仲刚. 光纤通信与光纤传感. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1993. 60~149  
Zhao Z G. Optical Fiber Communication and Optical Fiber Transducer. Shanghai: Shanghai Technology and Science Document Press, 1993. 60~149
- 薛春荣, 祝生祥, 肖志刚. 锥形光纤间的耦合特性. 光子学报, 2004, **33**(7): 803~805  
Xue C R, Zhu S X, Xiao Z G. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 803~805
- 刘德明, 向清, 黄德修. 光纤光学. 北京: 国防工业出版社, 1995. 122~148  
Liu D M, Xiang Q, Hong D X. Optical Fiber Optics. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. 122~148
- Tapia J, Khomenko A V, Cortes R, et al. High accurate fiber sensor with two-LED light source. *Optics Communications*, 2000, **177**(1-6): 219~223
- 王廷云, 罗承沐, 申焯. 半导体吸收式光纤温度传感器. 清华大学学报(自然科学版), 2001, **41**(3): 59~61  
Wang Y Y, Luo C M, Shen Z. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2001, **41**(3): 59~61

## Study on Absorption Fiber-optic Temperature Sensor

Duan Mengmeng, Chen Changle, Lei Songhe, Lei Xiaomei  
*School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*

Received date: 2005-04-21

**Abstract** A semiconductor absorption fiber-optic temperature sensor was designed for aircraft. The sensor was based on the temperature dependence of the band edge absorption of infrared light in GaAs semiconductor platelets. The sensor used GaAs chip as the sensitive element of temperature, and the optical fiber was medium of transmitted light, and the diode is the light source, and the triode is a transducer of photo-electricity. The twin-channel compensative measure system can eliminate the influence of light source fluctuation. In addition, the temperature sensor had many more advantages such as small in volume, simple in structure, high in sensitivity and resisting strong electromagnetic interference. According to the experiment, the sensor has accuracy of  $0.1^{\circ}\text{C}$  over a temperature range from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$ . It was suitable for measuring the environment temperature of the aircraft in strong electromagnetic interference. It was the base of achieving the temperature measurement further in optical transmission and craft controlling system.

**Keywords** Semiconductor; Temperature sensor; Sensitivity



**Duan Mengmeng** was born in 1981 in Shaanxi Province. She received the Bachelor's Degree from the Institute of Optical Engineering, Northwestern Polytechnical University in 2003. Now She is studying for the Master's Degrees in the same institute.