

文章编号: 0258-7025(2003)01-0075-04

用于海洋井下温度检测的反射式光纤 传感器及补偿技术

赵勇¹, 荣民^{1,2}, 廖延彪¹

(¹ 清华大学电子工程系, 北京 100084; ² 河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071000)

摘要 利用半导体材料吸收光谱的临界极限值随温度变化发生移动而导致出射光强改变的特性, 实现了海洋井下温度的检测。描述了反射式光纤传感器的结构和测量原理。提出了共光路参考测量结构的设计和节点式误差补偿技术, 详细的理论分析表明, 提出的传感器系统可以有效地改善光源强度波动、光电探测器件的响应度和电路的放大倍数差异等对测量带来的误差影响, 从而可以适应海洋井下长期恶劣的工作环境, 保证一定的测量稳定性。该传感器可以实现 $-20\sim 175^{\circ}\text{C}$ 的温度测量范围。

关键词 海洋测绘; 温度测量; 补偿技术; 光纤传感器; 反射; 海洋石油勘探

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Reflex Optical Fiber Sensor and Compensation Technique for Temperature Measurement under Offshore Oil Well

ZHAO Yong¹, RONG Min^{1,2}, LIAO Yan-biao¹

(¹ *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
² *College of Electronic and Informational Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China*)

Abstract A novel fiber optic sensor used for temperature measurement under the offshore oil well was proposed based on the displacement of the optical absorption edge occurring in semiconductors under the influence of temperature variation as a result of temperature-induced energy shifting of conduction band extrema. The structure of the sensor and the measurement principle were described. The common-path reference measurement and node type error compensation technologies were developed. And the detailed theoretical analysis indicated that the proposed sensor system could effectively improve measurement errors caused by the light fluctuation, difference and variation of the detector responsiveness and the circuit magnification times, the transmission loss, and so on. It approved that this sensor system could be applied under the long-term formidable conditions with fairly good measurement stability. The temperature measurement range is from -20°C to 175°C .

Key words ocean mapping; temperature measurement; compensation technique; optical fiber sensor; reflex; offshore oil drilling

1 引言

温度检测是测量科学和过程控制领域中最重要研究热点之一^[1]。海水温度的检测对研究海洋学、海洋环境监测、季节气候预测以及海洋渔业等有十分重要的应用背景和实际意义。温度也是海洋石

油勘探业中的一个重要的基本参数。近些年来, 国内外一直对光纤温度检测的新方法及实用化等关键技术进行着试验和理论研究工作, 而且有些已经被应用到工业领域之中^[2~4]。但是, 国内外海底温度的测量, 尤其是在海洋石油测井中多采用铂电阻温度传感器, 国内的测井公司大都采用国外进口的

收稿日期: 2001-10-11; 收到修改稿日期: 2001-12-11

作者简介: 赵勇(1973—), 男, 清华大学电子工程系博士后, 博士, 毕业于哈尔滨工业大学, 主要从事激光光纤传感技术及其在工业中的应用研究。E-mail: zhaoy@ee.tsinghua.edu.cn

Pt500 型铂电阻温度传感器,其价格昂贵,而且非常容易损坏;由于其特殊的标度方法(对应零度时的电阻为 500 Ω)又很难用国内的铂电阻 Pt100(对应零度时的电阻为 100 Ω)取代;另外,电信号传输速度慢、带宽窄、衰减大、易受电磁场干扰。因此迫切需要研究出一种具有低成本、适应性强、工作可靠、体积小、的海下温度传感器。光纤传感技术在传感器市场中占有越来越重要的地位,因为工业界人士已经开始认识到它与其他常规传感器相比所能体现出的大量突出的优点。比如,传感元件无需电子单元、阻燃防爆防腐、灵敏度高、柔性易弯曲、防电磁干扰、可在高温高压下工作、传感器结构简单小巧、易实现远距离信号传输并且信号损耗小等^[5~7]。

本文提出了一种用于井下温度检测的反射式光纤传感器结构,并设计了一种节点式的误差补偿网络结构。理论分析表明了传感器设计和补偿技术的合理性和实用性。

2 传感器结构与测量原理

温度测量是基于半导体 GaAs 吸收光谱的临界边随温度的变化而发生移动,从而导致接收端光强发生变化的原理。纯的 GaAs 晶体对红外光是呈现透明性质的,而对可见光则是不透明的;在常温常压时,它的光吸收临界波长为 867 nm。传感器使用的光源发射光谱应该对应被测温度上下限的两个吸收临界光波长。这样,由温度变化引起的这个吸收边的位置移动就会调制处于吸收带内部分的光能量,即意味着传输光强的改变。

基于 Lambert 吸收定律,半导体的吸收特性可以描述为

$$I(l, T) = I_0 \cdot (1 - R) \cdot \exp[-\alpha(T) \cdot l] \quad (1)$$

其中, I_0 为入射光强, l 为光经过半导体材料的厚度, R 为半导体材料入射面的反射系数, $\alpha(T)$ 是在温度为 T 时半导体的吸收系数。GaAs 的吸收系数可表示为^[8]

$$\alpha(T) = A \cdot [h\nu - E_g(T)]^{1/2} \quad (2)$$

其中, A 为材料常数, $E_g(T)$ 为与温度有关的禁带宽度, h 为普朗克常数, ν 为频率。根据 E. W. Williams 的早期研究^[10], 在 20~973 K 的温度范围内, $E_g(T)$ 可表示为

$$E_g(T) = E_g(0) - \gamma \cdot T^2 / (\beta + T) \quad (3)$$

其中, $E_g(0)$ 是当温度为 0 时的禁带宽度, γ 和 β 为两个经验常数。对于 GaAs 材料, $E_g(0) = 1.522$ eV, γ

$= 5.8 \times 10^{-4}$ eV/K, $\beta = 300$ K, $A \approx 2.462 \times 10^4$ ($\text{cm} \cdot \text{eV}$)⁻¹。

这样,基于式(3),半导体的吸收边波长可表示为^[9]

$$\lambda_g(T) = \frac{hc}{E_g(T)} = \frac{hc}{E_g(0) - \gamma \cdot T^2 / (\beta + T)} \quad (4)$$

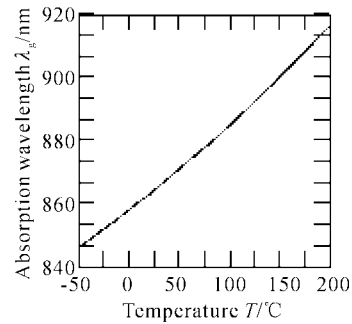


图1 温度与 GaAs 吸收波长的关系

Fig. 1 Relation curve between temperature and absorption wavelength

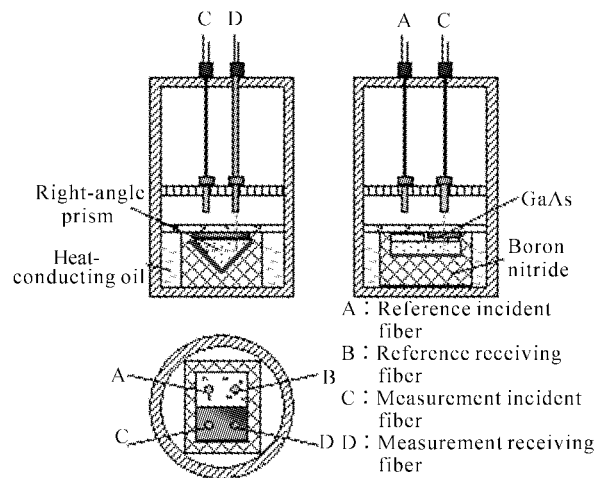


图2 反射式 GaAs 光纤温度传感器结构

Fig. 2 Structure of the reflex fiber-optic temperature sensor probe

图1 给出半导体吸收边波长随温度变化的仿真曲线。从曲线可以看出,温度升高,半导体吸收的临界光波长在向长波长方向移动,意味着能通过半导体材料的光谱范围越来越小,导致出射光强的降低;反之,若温度降低,则出射光强会有所增加,从而实现了温度对出射光强的调制。依据式(2)~(4),光强与温度的关系可以重写为以下形式

$$I(l, T) = I_0 \cdot (1 - R) \cdot$$

$$\exp\left\{-A \cdot \left[h\nu - E_g(0) + \frac{\gamma \cdot T^2}{T + \beta}\right]^{1/2} \cdot l\right\} \quad (5)$$

由式(5)可以再次看到出射光强与被测温度的函数关系。图 3 给出了在不同入射光波长的情况下, 半导体 GaAs 材料随温度变化对光的吸收后出射光强特性曲线。可见, 当温度升高时, 半导体材料对入射光的吸收边 λ_g 向波长较大的方向移动; 当温度较低时, 对波长较大的光来说, 基本上是不吸收的。而当温度继续升高到吸收边超过了某一波长以后, 对光开始有吸收作用。

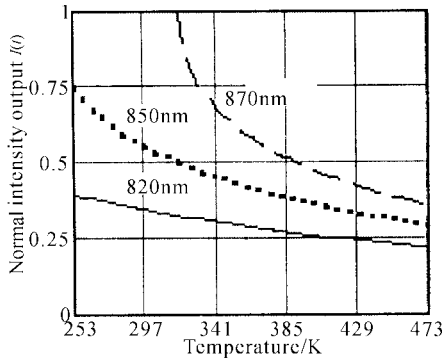


图 3 温度与不同波长入射光的出射光强关系
Fig. 3 Intensities versus temperature of different light wavelengths

依据以上理论基础, 并考虑到海洋井下环境条件等因素, 反射式光纤温度传感器的探头结构设计如图 2 所示。探头外径可以在 4 cm 以内, 长度在 7 cm 之内。采用双路光纤收发系统, 以实现参考测量。图 2 中 C, D 分别为测量路的发射和接收光纤, A, B 分别为参考路的发射和接收光纤, 两路光纤的发射和接收采用完全相同的光源和光纤材料, 并且在结构上保证光路的一致。

3 补偿技术研究

采用双光路归一化测量方法, 可以减小光源波动及其他介质吸收干扰等误差源带来的影响。同时, 采用一个光纤补偿网络结构, 进一步消除两路接收电路系统的放大倍数、响应度等光电特性不一致造成的测量误差。具体的补偿网络原理如图 4 所示。整个系统包括光源、光隔离器、光开关、 1×2 和 2×1 分光耦合器、发射和接收光纤及光电探测器。工作原理分析如下: 隔离器保证传感器在感受镜面反射光时, 没有光返回进入激光器以影响光功率的稳定; 光开关的作用是将激光器发出的光在不同的时刻耦合进(I)和(II)两路光通道; 光从发射经传感区到接收的传输通道可分为四条, 如图 5 所示。

并分别由两只光电探测器接收, 传输系数分别设为 $\delta_{13}, \delta_{14}, \delta_{23}, \delta_{24}$ 。

由图 4 可以得出, 传输系数可分别写成

$$\delta_{13} = K_1 K_2 K_4 a_1 M + K_1 K_2 K_4 (1 - a_1) K_5 M' K_7 a_2 \quad (6)$$

$$\delta_{14} = K_1 K_2 K_4 (1 - a_1) K_5 M' K_7 (1 - a_2) \quad (7)$$

$$\delta_{23} = K_1 K_3 K_6 M' K_7 a_2 \quad (8)$$

$$\delta_{24} = K_1 K_3 K_6 M' K_7 (1 - a_2) \quad (9)$$

其中, $K_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 为隔离器、光开关及分光耦合器的传光损耗系数, $a_i (i = 1, 2)$ 分别为耦合器的分光系数, M 为带有温度信息的传感器调制函数(测量光路), M' 为不带温度信息的传感器调制函数(参考光路)。

这样, 在不同的时间段内, 每只探测器将探测到两组信号 Q_{13}, Q_{23} 和 Q_{14}, Q_{24} , 分别可表示为

$$Q_{13} = P \cdot \epsilon_{13} \cdot \delta_{13} \cdot H_1 \cdot A_1 \quad (10)$$

$$Q_{23} = P \cdot \epsilon_{23} \cdot \delta_{23} \cdot H_1 \cdot A_1 \quad (11)$$

$$Q_{14} = P \cdot \epsilon_{14} \cdot \delta_{14} \cdot H_2 \cdot A_2 \quad (12)$$

$$Q_{24} = P \cdot \epsilon_{24} \cdot \delta_{24} \cdot H_2 \cdot A_2 \quad (13)$$

其中, P 为激光器出光功率, $\epsilon_{13}, \epsilon_{23}, \epsilon_{14}, \epsilon_{24}$ 分别为四条光通道中的光纤传输损耗系数, H_1, H_2 及 A_1, A_2 分别为两组光电器件的响应度和放大电路的放大倍数。对这些信号进行归一化处理, 令 $V = \frac{Q_{13} Q_{24}}{Q_{23} Q_{14}} =$

$\frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24} \delta_{13} \delta_{24}}{\epsilon_{23} \epsilon_{14} \delta_{23} \delta_{14}}$, 将式(6) ~ (9) 代入, 整理得

$$V = \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24}}{\epsilon_{23} \epsilon_{14}} \left[\frac{a_1}{a_2 (1 - a_1) K_5 K_7} \cdot \frac{M}{M'} + 1 \right] = \mathcal{R} \frac{M}{M'} + \mathcal{Z} \quad (14)$$

其中, $\mathcal{R} = \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24} a_1}{\epsilon_{23} \epsilon_{14} a_2 (1 - a_1) K_5 K_7}$, $\mathcal{Z} = \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24}}{\epsilon_{23} \epsilon_{14}}$ 。可见, 在传感器网络参数不变的情况下, 系统的输出与传感信号 M/M' 为线性的函数关系, 与光源功率大小、光电器件响应度、放大电路的放大倍数等无关; 进一步, 我们可以将测量光路的调制函数写成 $M = C_1 f_s(T) f_o(T)$, 其中 $f_s(T)$ 是半导体材料对光的吸收调制函数, $f_o(T)$ 是探头内部其他组件(包括隔离玻璃板、直角棱镜等)对光的吸收调制函数, C_1 是结构常数; 同理, 参考光路的调制函数可写成 $M' = C_2 f_o(T)$; 这样, 式(14) 可以改写为

$$V = \mathcal{R} \frac{M}{M'} + \mathcal{Z} = \mathcal{R} \frac{C_1 f_s(T) f_o(T)}{C_2 f_o(T)} + \mathcal{Z} = \mathcal{R} \frac{C_1}{C_2} f_s(T) + \mathcal{Z} = \Theta \cdot f_s(T) + \mathcal{Z} \quad (15)$$

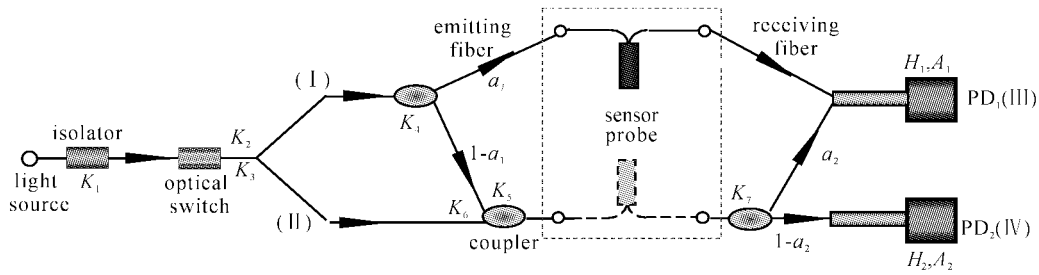


图 4 光纤温度传感器的补偿网络

Fig. 4 Compensation network of the reflex fiber-optic temperature sensor

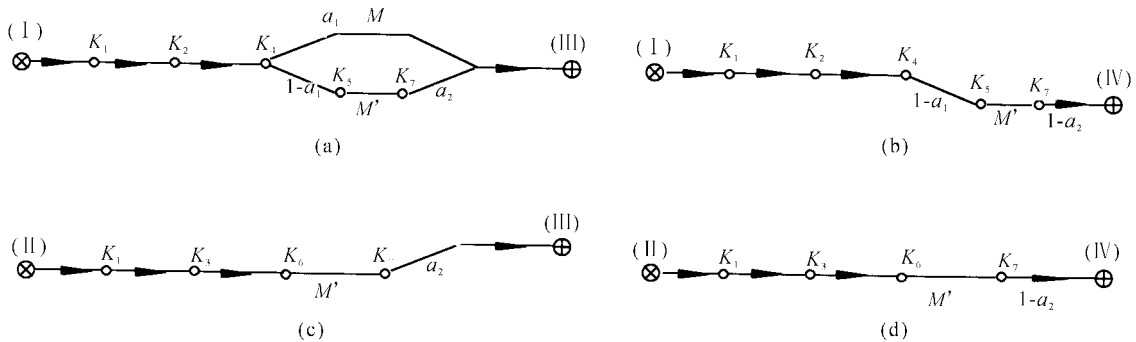


图 5 四条传输通道及其参数

Fig. 5 Four light transmission paths and their parameters (δ_{13} , δ_{14} , δ_{23} , δ_{24})

从而,又进一步消除了其他介质对光吸收造成的测量误差,而改善了光纤传感系统的长期稳定性和测量精度。

4 结 论

提出了一种用于海洋井下温度检测的半导体吸收光纤式温度传感器及其补偿技术。对其测量原理和误差补偿技术进行了详细的理论分析。其特点是体积小、携带方便、抗干扰能力强、可实现信号的远距离传输、具有误差补偿功能,可以得到较好的长期稳定性。尤其是在环境比较恶劣的条件下,该传感器具有明显的应用价值。还可以用于其他场合下的液体或气体的温度测量。

参 考 文 献

- 1 Francis Berghmans, M. Decretion. Evaluation of three different optical fibre temperature sensor types for application in Gamma radiation environments [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, **45**(3):1537~1542
- 2 Woo-Hu Tsai, Chun-Jung Lin. A novel structure for the intrinsic Fabry-Perot fiber-optic temperature sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(5):682~686

- 3 Giovanni Betta, Antonio Pietrosanto. An intrinsic fiber optic temperature sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(1):25~29
- 4 Shyh-Lin Tsao, Jingshown Wu. Highly accurate temperature sensor using two fiber Bragg gratings [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 1996, **2**(4):894~897
- 5 Zhao Yong, Li Pengsheng, Wang Chenshuang *et al.*. A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement [J]. *Sensors & Actuators: A*, 2000, **86**(3):211~215
- 6 Zhao Yong, Li Pengsheng, Pu Zhaobang. Shape measurement based on fiber-optic technique for complex internal surface [J]. *Measurement*, 2001, **30**(4):289~295
- 7 Zhao Yong, Li Pengsheng, Pu Zhaobang. MJ internal thread used for aerospace and its noncontact test method with fiber-optic sensor [C]. *SPIE*, 1999, **3740**:501~504
- 8 K. B. Hilgers, I. Kaufman. A fiberoptic differential temperature probe [C]. *SPIE*, 1987, **838**:223~230
- 9 D. A. Christensen, V. A. Vaguine. A fiberoptic temperature sensor using wavelength-dependent detection [C]. *SPIE*, 1987, **838**:252~256
- 10 E. W. Williams, R. Hall. Luminescence and the Light Emitting Diode [M]. Oxford: Pergamon Press, 1978. Eq. (2. 2)