

文章编号 : 0253-2239(2002)10-1241-04

# 海水盐度和温度实时检测的新型光纤传感器研究

赵 勇 廖延彪

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 提出了一种新颖的用于海水温度和盐度同时实时探测的光纤传感器系统。分别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和待测液体盐度变化引起传输光折射角改变导致接收端光线偏移的性质, 通过反射式的结构设计和线阵排列的接收光纤将信号传输至海面以上, 并由 CCD 实现对光强峰值信号及其偏移量的采集。传感器由一直角棱镜、本征 GaAs 单晶体薄片、装有参考液和待测液的水槽、接收光纤阵列等部分组成。理论分析和仿真结果验证了传感器设计的可行性。

关键词: 盐度测量; 温度测量; 光纤传感器; 光吸收; 光折射; 砷化镓晶体

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A

## 1 引 言

海水温度和盐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实用意义。温度也是海洋石油勘探业中的一个重要的基本参数。以往国内外海下温度的测量, 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 Pt500 型铂电阻温度传感器, 其价格昂贵, 由于其特殊的标度方法(对应 0 °C 时的电阻为 500 Ω)又很难用国内的铂电阻 Pt100(对应 0 °C 时的电阻为 100 Ω)取代。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。在海港进出口贸易中, 水尺计重的重要依据就是海水盐度和密度的准确测量。以往是用专门的采样装置在船尾部和中部的各个深度采集有代表性的水样, 再进行测量。不仅过程繁琐、费时费力, 而且取样液体常常并非按计量规程所要求的吃水深度一半处的液体, 而参有一定量的上层液体而造成误差。近年来, 光纤传感技术在传感器市场中占有越来越大、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它常规传感器相比所能体现出的大量而突出的优点。例如, 传感元件无需电子单元、防燃防爆防腐蚀、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<sup>[1-3]</sup>。

对光的折射和吸收是物质的两个内在的特性。人们对物质折射率的测量曾提出过多种方法, 并应用于实践当中<sup>[4]</sup>; 利用半导体材料对光的吸收效应实现压力和温度的测量也有报道<sup>[5,6]</sup>。然而, 满意的测量结果只限于在环境条件良好的实验室里才能得到, 而工程实际中需要传感器能够在现场环境下工作, 有时候环境条件相当恶劣, 这就要对传感器进行重新的设计。本文基于折射率差测量原理和半导体光吸收原理提出了一种新颖的反射式光纤传感器, 实现了对海下温度和盐度的同时探测。根据前人的研究结果<sup>[7-9]</sup>, 海水折射率与盐度之间主要关系可总结为: 1) 在温度不变的情况下, 折射率随盐度的变化率是, 盐度每变化 1‰, 折射率变化  $2 \times 10^{-4}$ ; 2) 在盐度不变的情况下, 折射率随温度升高而降低, 在 2 °C ~ 3 °C 范围内, 温度每变化 1 °C, 折射率变化  $5 \times 10^{-5}$ ; 而在 20 °C 左右, 温度每变化 1 °C, 折射率变化  $1 \times 10^{-4}$ 。可见温度对海水折射率的测量是有很影响的, 所以应该采用测量待测液与参考液折射率差的办法解决这一问题。原因是折射率差的测量受温度的影响很小, 温度每变化 1 °C, 折射率差变化  $4 \times 10^{-7}$ , 这样的变化率给盐度测量带来的影响仅相当于 0.002‰。

## 2 测量原理

盐度的测量原理是基于检测与盐度几乎成正比的折射角的变化来实现的, 并用 CCD 摄像器件感受由于折射角变化引起接收光线的偏移量。传统的折射率测量方法是用一个显微镜直接目测折射临界角

度的大小,显然这种方法不适合长时间连续的远距离测量。图 1 给出了本文提出的整体的测量原理框图。发光二极管发出的光束通过具有低损耗、低噪声和较高耐腐蚀性的光纤光缆发送到测量单元。

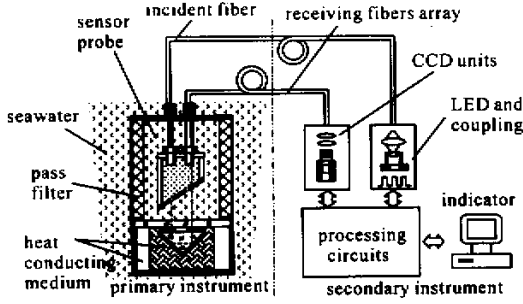


Fig.1 Schematic diagram of the measurement system

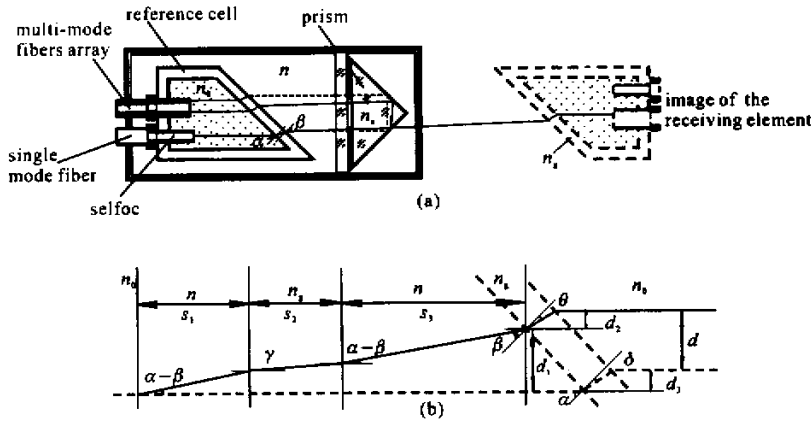


Fig.2 (a) Sensing probe and the beam path ;(b) Equivalent transmission beam path

在图 2 所示的几何光学光线轨迹中,用  $d$  来表示 CCD 所测得的当被测液分别是海水(实光线)和蒸馏水(虚光线)时的光线偏移量。根据图示几何关系和光学折射定律,有

$$\left. \begin{aligned} d &= a_1 + d_2 - d_3, \\ d_1 &= (s_1 + s_3) \tan(\alpha - \beta) + s_2 \tan \gamma, \\ d_2 &= t \sin(\alpha - \theta), \\ d_3 &= t \sin(\alpha - \delta), \end{aligned} \right\} (1)$$

和

$$\left. \begin{aligned} n_0 \sin \alpha &= n \sin \beta, \\ n \sin(\alpha - \beta) &= n_s \sin \gamma, \\ n \sin \beta &= n_g \sin \theta, \\ n_0 \sin \alpha &= n_g \sin \delta. \end{aligned} \right\} (2)$$

式中,  $t$  为倾斜玻璃板的厚度,  $s_1$  为光线第一次进入被测液体时的光程,  $s_3$  为光线第二次返回被测液体时的光程,  $s_2$  是光线经过隔离玻璃板、半导体材料

图 2 给出了传感探头的结构和光线传播路径及折射情况。传感探头主要可分为两部分,一部分是装有参考液和待测液的水槽,作为参考液体的蒸馏水装在密封的楔形槽中,待测的海水通过过滤网和吸附膜的过滤后进入外围的水槽中;另一部分被称为感温反射单元,其中 GaAs 晶体薄片(0.1 mm ~ 0.2 mm)用于实现对温度的感受,在其下面紧贴一个直角棱镜用于改变光路方向,周围是具有高导热系数的导热材料。这两部分用一玻璃板隔离,以防止敏感材料长时间受海水侵蚀。激光束以竖直方向入射,通过折射率为  $n_0$  参考液体后以  $\alpha$  角度入射到倾斜玻璃板,折射后进入折射率为  $n$  的待测液体,再依次进入隔离板、半导体材料和反射棱镜。

及直角棱镜正反行程时的总光程。

从(2)式可以看到,当参量  $\alpha$ 、 $n$ 、 $t$  和  $n_g$  选定后,  $\theta$  和  $\delta$  就是固定的值,这样  $d_2$  和  $d_3$  也是定值,将(2)式代入(1)式,得到光线偏移量为

$$\begin{aligned} d &= d_0 + (s_1 + s_3) \tan \left[ \alpha - \arcsin \left( \frac{n_0}{n} \sin \alpha \right) \right] + \\ & s_2 \tan \left( \arcsin \left\{ \frac{n}{n_s} \sin \left[ \alpha - \arcsin \left( \frac{n_0}{n} \sin \alpha \right) \right] \right\} \right) \\ &= f(n), \end{aligned} (3)$$

其中  $d_0 = d_2 - d_3$ 。由于 GaAs 晶体相对很薄,所以这里对光线的折射偏移量可以忽略不计。

据此,液体的盐度就可以通过事先对已知盐度测量的标定曲线得到。盐度测量范围和测量灵敏度取决于传感探头各部件的几何尺寸和 CCD 系统的分辨率。

温度测量是基于 GaAs 晶体对光的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。纯的砷化镓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,它的光吸收临界边值为 867 nm。传感器使用的光源的发射光谱应该涵盖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。

基于朗伯(Lambert)吸收定律,半导体的吸收特性可以描述为

$$I(l, T) = I_0(1 - R) \exp[-\alpha(T)l], \quad (4)$$

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

$$\alpha(T) = A[h\nu - E_g(T)]^{1/2}, \quad (5)$$

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,  $\nu$  为频率。根据 Panish 的早期研究,在 20 K ~ 973 K 的温度范围内,禁带宽度  $E_g(T)$  可表示为

$$E_g(T) = E_g(0) - \gamma T^2 / (\beta + T), \quad (6)$$

其中,  $E_g(0)$  是当热力学温度为 0 K 时的禁带宽度,  $\gamma$  和  $\beta$  为两个经验常数。对于 GaAs 材料,  $E_g(0) = 1.522$  eV,  $\gamma = 5.8 \times 10^{-4}$  eV/K,  $\beta = 300$  K,  $A \approx 2.462 \times 10^4$  (cm·eV)<sup>-1</sup>。

基于(6)式,半导体的吸收边波长可表示为

$$\lambda_g(T) = \frac{hc}{E_g(T)} = \frac{hc}{E_g(0) - \gamma T^2 / (\beta + T)} \quad (7)$$

图 3 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(5)式~(7)式,

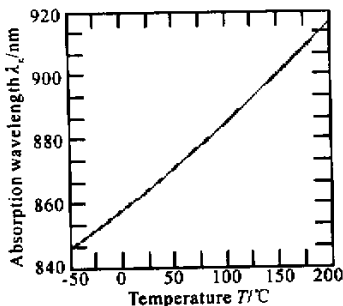


Fig. 3 Relation curve between temperature and absorption wavelength

光强与温度的关系可以重写为以下形式

$$I(l, T) = I_0(1 - R) \times \exp\left\{-A\left[h\nu - E_g(0) + \frac{\gamma T^2}{\beta}\right]^{1/2} l\right\}, \quad (8)$$

由(8)式可以再次看到出射光强与被测温度的函数关系。

### 3 传感器参量的选择

基于以上的理论分析和仿真结果,传感器光源选用中心波长为 880 nm、光谱半宽为 40 nm 的发光二极管(LED),并带有单模的尾纤输出。在进入传感单元之前,发光二极管的输出光被监测用以补偿光强的波动。在入射的单模光纤的端面粘结一个自聚焦透镜(SELFOC),目的是对光线进行准直,以改善光线质量,提高测量的分辨率。楔形的水槽装满参考液体蒸馏水,其内部尺寸为 30 mm,壁厚 2.5 mm,倾斜部分厚 2 mm,并成 45°。一块厚度为 2 mm 的隔离玻璃板将被测液体与感温元件及反射棱镜等隔开,以防止敏感材料长期受海水的侵蚀。半导体砷化镓感温材料的厚度是 150 μm,为了提高灵敏度,在满足被测范围的前提下,可以适当增加其厚度。选用敏通公司的 ALPHA 系列 CCD 实现对光线偏移量的检测,像素为 795 × 596,光敏面尺寸为 6.4 mm × 4.8 mm,像元的大小为 8 μm。根据前期的实验结果,光斑重心坐标检测的重复性精度比较高,其标准差好于 0.2 μm,而光线偏移量的测量偏差在 ±5 μm 之内。根据资料显示,海水盐度变化量一般在 0~40‰,对应的折射率范围大约在 1.333~1.340 之间。根据上述的探头部分的尺寸参数,产生的光线的最大偏移量在 300 μm 左右。如果将这一偏移量经过放大后再由 CCD 探测,则放大倍数至少可确定为 (4.8 × 1000) / 300 = 16,再通过亚像素的细分技术,CCD 的分辨率可达 1 μm 左右,而对应实际被测光线偏移量的分辨力为 0.0625 μm,这样可以估计出盐度测量的分辨力将好于 0.01‰。根据所选择的光源,温度的测量范围在 -20 °C ~ 175 °C 之间。盐度的测量范围可以根据线阵接收光纤阵列的接收范围和传感探头的长度进行调节,测量范围大,就要增大接收光纤阵列的有效接收长度,并可以通过减小光线传播光程,即缩短探头尺寸的办法,但这样会降低灵敏度。

结论 本文提出了一种用于测量海水深水温度和盐

度的光纤传感器系统,对测量原理进行了详细的理论分析,对传感器的结构设计和参量选择作了介绍。这种传感器的独特之处在于能够同时给出海水的温度和盐度信息,信号处理方法简单,传感器体积小,重量轻,便于携带,有较高的性能价格比,实用化程度高,灵敏度高且可以调节,测量范围可调,可实现远距离自动化连续的测量,而且在很多领域中有应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Zhao Yong, Li Pengsheng, Wang Chenshuang *et al.*. A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement. *Sensors and Actuators (A)*, 2000, **86**(3) 211~215
- [2] Zhao Yong, Li Pengsheng, Pu Zhaobang. Shape measurement based on fiber-optic technique for complex internal surface. *Measurement*, 2001, **30**(4) 289~295
- [3] Zhao Yong, Liu Lihua, Li Pengsheng *et al.*. Research on a novel fiber-optic triangulation sensor used for surface precision measurement. *Acta Optica Sinica*(光学学报),

- 2002, **22**(4):476~480(in Chinese)
- [4] Domanski A W, Roszko M. Compact optical fiber refractive index differential sensor for salinity measurement. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, Canada, 1997. 953~956
- [5] Bock W J, Beaulieu M, Domanski A W. GaAs-based fiber optic pressure sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1992, **41**(1) 68~71
- [6] De Lyon T J, Roth J A, Chow D H. Substrate temperature measurement by absorption-edge spectroscopy during molecular beam epitaxy of narrow-band gap. *J. Vacuum Science Technology (B)*, 1997, **15**(2):329~336
- [7] Miyake Y. Chemical studies of the Western Pacific Ocean VI: The refractive index of seawater. *Bull. Chem. Soc. Japan*, 1939, **14** 239~242
- [8] Stanley E M. The refractive index of seawater as a function of temperature, pressure and two wavelengths. *Deep. Sea. Res.*, 1971, **18** 833~840
- [9] Rusby J S. Measurement of the refractive index of seawater relative to Copenhagen standard seawater. *Deep. Sea. Res.*, 1967, **14** 427~439

## Novel Optical Fiber Sensor for Simultaneous Undersea Temperature and Salinity Measurement

Zhao Yong Liao Yanbiao

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 8 October 2001; revised 27 November 2001)

**Abstract:** A new optical fiber sensor developed for simultaneously measuring the seawater temperature and salinity is described. The sensor respectively exploits the displacement of the optical absorption edge in semiconductors under the influence of temperature variation as a result of temperature-induced energy shifting of conduction band extrema, and the beam deviation caused by the optical refraction at the receiving end face due to the salinity of seawater. The measured optical signals are reflected and transmitted through a sequentially linear arranged fibers array, and then the light intensity peak value and its deviant are detected by a charge-coupled device (CCD). The sensor probe is composed of an intrinsically pure GaAs single crystal, a right angle prism, a partitioned water cell, the emitting fiber with an attached self-focused lens and the linear arranged receiving fibers array. Theoretical analysis and simulations verify the feasibility of the proposed system.

**Key words:** salinity measurement; temperature measurement; optical fiber sensor; optical absorption; optical refraction; GaAs crystal