

文章编号: 0258-7025(2003)11-1006-05

# 一种基于声光可调谐滤波器的 新型温度传感器

王顺权, 胡鸿璋, 肖立峰, 潘 笈

(天津大学理学院应用物理学系, 天津 300072)

**摘要** 集成光学声光可调谐滤波器(Integrated Acousto-optic Tunable Filter, IAOTF)的滤波特性对外界环境温度的变化特别敏感,因此可以将声光可调谐滤波器(AOTF)滤波特性的中心频率的变化作为已知条件,反过来判断外界环境温度的变化。利用这一思想,制成了基于集成光学声光可调谐滤波器的温度传感器。这种新型的温度传感器测温范围在 $-40^{\circ}\text{C}$ 到 $150^{\circ}\text{C}$ 之间,精度能达到 $0.001^{\circ}\text{C}$ ,更重要的是能做成分布型的温度传感器组,进行远程集中监控,这些优点使得这种新型的温度传感器在高精度和分布式温度传感领域具有重要的应用价值。

**关键词** 光电子学;温度传感器;声光可调谐滤波器;集成光学

**中图分类号** TP 212 **文献标识码** A

## A Novel Temperature Sensor Based on Acousto-optic Tunable Filter

WANG Shun-quan, HU Hong-zhang, XIAO Li-feng, PAN Ji

(Applied Physics Department, College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** The filtering characteristic of acousto-optic tunable filter (AOTF) is very sensitive to the change of the ambient temperature, so the ambient temperature can be obtained from the changing central frequency of AOTF's filtering characteristic. Using the idea, a novel temperature sensor based on AOTF is fabricated. The temperature range measured by the new temperature sensor is from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $150^{\circ}\text{C}$ , and the precision can be up to  $0.001^{\circ}\text{C}$ . Furthermore, a kind of distributed temperature sensors to supervise and control the temperature of many distributed sites at a central place can be developed. The novel temperature sensor has an important application in the precise and distributed temperature sensor field for these advantages.

**Key words** optoelectronics; temperature sensor; acousto-optic tunable filter (AOTF); integrated optics

## 1 引 言

温度传感器的种类繁多,包括红外辐射温度传感器、石英温度传感器、超声波温度传感器和光纤温度传感器等等。在众多种类的温度传感器中,光纤温度传感器由于具有精度高、稳定性好,并且能做成分布式等特点,得到了广泛的关注,发展迅速<sup>[1~4]</sup>。实际上,所有与温度相关的光学现象或特性,本质上都可用于温度的测量<sup>[5]</sup>。根据这一思想,本文利用现代光通信系统中的核心器件声光可调谐滤波器

(AOTF)的滤波特性对温度特别敏感这一特点,通过判断 AOTF 滤波特性的变化来判断当前环境的温度值,得到了令人满意的结果。理论和实验表明,这种基于 AOTF 的温度传感器能达到 $0.001^{\circ}\text{C}$ 精度水平,并且很容易做成分布式的形式。另外,随着光通信技术的发展,AOTF 的性能将得到不断的提高,从而进一步促使基于 AOTF 的温度传感器达到更高的精度和更好的稳定性。因此,这种基于 AOTF 的新型温度传感器在高精度和分布式温度

收稿日期:2003-03-07;收到修改稿日期:2003-05-23

基金项目:国家自然科学基金(编号:10084001)资助项目。

作者简介:王顺权(1979—),男,安徽黄山人,天津大学理学院应用物理系硕士研究生,现主要从事集成光电子学研究。E-mail:shunquanwang@163.com

传感领域具有重要的应用价值。

## 2 理论分析

伴随有声波的媒质可以近似地看作周期性媒质,根据耦合模理论,一束 TE 偏振或 TM 偏振的光波入射到这样的媒质中,在满足布拉格条件时会耦合出另一束偏振方向与之垂直的平面光波<sup>[6]</sup>。如图 1 所示,在 X 切 Y 传铌酸锂晶体上制作模转换器和 TE 通偏振器,当光波以 TM 模耦入光波导后,经 TM $\rightleftharpoons$ TE 模转换器后转变为 TE 模,然后经 TE 通

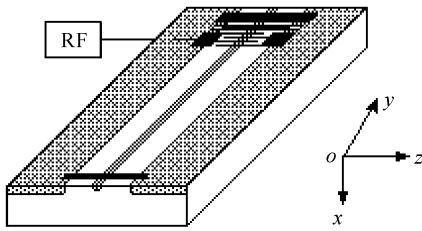


图 1 声光可调谐滤波器(AOTF)的结构简图

Fig. 1 Simplified configuration of acousto-optic tunable filter (AOTF)

偏振器检偏后输出。当有一系列不同波长的信号光波  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  耦入器件时,只有满足布拉格条件的信号光波才能通过,因此达到滤波作用。TE 模和 TM 模模式耦合的基本条件是位相匹配,可以表示为

$$\Delta\beta = |\beta_{TE} - \beta_{TM}| - m \frac{2\pi}{\Lambda} = 0 \quad (1)$$

其中  $\beta_{TE}, \beta_{TM}$  分别为入射波(或耦合波)和耦合波(或入射波)的波矢量在传播方向上的分量,  $m$  为媒质介电张量的周期性微扰的傅里叶分量的阶数,  $\Lambda$  为声波波长。

假设声波与光波的传播方向共线,TE 模和 TM 模的轴向传播常数分别为  $k_{TE}$  和  $k_{TM}$ ,相应的频率分别为  $f_{TE}$  和  $f_{TM}$ 。当 TE 和 TM 模相互耦合时,需要满足能量守恒和动量守恒条件

$$f_{TE} = f_{TM} \pm f_a \quad (2)$$

$$k_{TE} = k_{TM} \pm K_a \quad (3)$$

其中  $f_a$  为声波频率,  $K_a = 2\pi/\Lambda = 2\pi f_a/V_a$  为声波的传播常数,  $V_a$  为声表面波的传播速度。公式(2)和(3)右边的正负号取决于声波相对于光波的传播方向以及  $k_{TE}$  和  $k_{TM}$  的相对大小<sup>[7]</sup>。当输入光波为 TM 模且  $k_{TM} > k_{TE}$  时,对于从左向右传播的光波要求公式(2),(3)的符号为正。由于  $k_{TE} = \frac{2\pi}{\lambda}n_{TE}, k_{TM} =$

$\frac{2\pi}{\lambda}n_{TM}$ ,所以公式(3)可以化简为

$$\lambda = \Lambda |n_{TE} - n_{TM}| = \Lambda \cdot \Delta n \quad (4)$$

其中  $\Delta n$  为波导的双折射率,自由空间光波波长  $\lambda = c/f, n_i (i = TE, TM)$  为模式有效折射率。由于  $\Lambda = \frac{\lambda}{\Delta n}$ ,因此 AOTF 滤波特性的中心频率仅仅取决于

光波的频率和波导的双折射率。在实验室自行研制的 AOTF 中,光波导是由 Ti 扩散后的 LiNbO<sub>3</sub> 形成的,双折射率  $\Delta n = n_e - n_o$  是随温度变化的,它们之间在温度变化幅度不太大时有一个很简单的线性变化关系,当光波波长在 1574 nm 时,  $d(\Delta n)/dT = -3.76 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。但是,当温度变化范围很大时,波导双折射率随温度的变化是非线性的,如图 2 所示。若环境温度发生变化,而输入的光波波长保持

不变,如果要一直满足  $\Delta\beta = 0$ ,即  $\frac{2\pi}{\lambda} |n_{TE} - n_{TM}| = K_a$  这一条件以滤出相应波长的光波,则射频信号发生器(RF)所输出的声波频率就必须发生相应的改变。温度变化给滤波器的滤波特性的稳定性造成了极大的影响,这本来是 AOTF 的一个缺点,但若将声波频率的变化作为已知条件,反过来可以判断当前的环境温度,利用这一特点制成了一种新型的温度传感器。

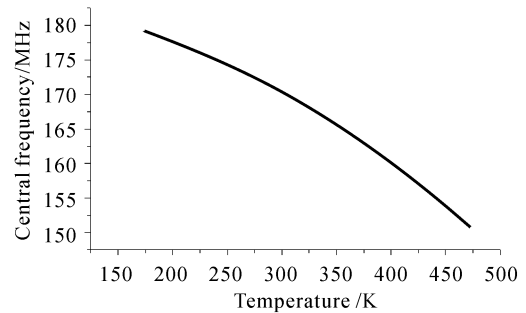


图 2 理论计算的温度和中心频率的对应关系

Fig. 2 Theoretical values of central frequency versus temperature

理论计算表明,实验室制作的 Ti 扩散后的 LiNbO<sub>3</sub> 其双折射率  $\Delta n$  随环境温度的变化呈现一种准线性的关系<sup>[8]</sup>,那么按照以上的分析可知系统的环境温度和 AOTF 滤波特性的中心频率也呈现一种准线性的关系,如图 2 所示。图 2 中,计算了 173 K 到 473 K 间双折射率随温度的变化曲线,可以看出在相对较小的温度范围内(如小于 100 K 的范围),双折射率随温度的变化几乎是线性的,相应的滤波特性的中心频率随温度的变化也几乎是线性

的。因此根据得到的  $T-f_c$  曲线,测得 AOTF 在某—环境下其滤波特性的中心频率后,就可以准确判断环境的温度。由于在  $-40^{\circ}\text{C}$  到  $150^{\circ}\text{C}$  的温度范围内,Ti 扩散  $\text{LiNbO}_3$  的工作特性最为稳定<sup>[8]</sup>,因此,理论上说,基于 AOTF 的温度传感器的测温范围在  $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$  之间。

### 3 器件的制作与测量

基于 AOTF 的温度传感器整体模型如图 3 所示,其中 AOTF 本身就是一个测温探头。图中分布反馈(DFB)激光器发出的单色光“Input”为线偏振光,经过偏振控制器以后尽可能地转化为 TM 通的偏振光,而后进入由 Ti 扩散而形成的单模光波导 4 中。高频信号发生器产生的高频信号经过匹配电路后使叉指换能器 2 发生谐振,谐振产生的声波在声波导 3 中传播,和进来的 TM 偏振光发生耦合。在光波和声波的位相匹配条件满足后,TM 偏振光就会转化成相应频率的 TE 偏振光(由于声波的调制作用,光波已经发生了微小的频移),TE 通偏振器 6 再将转化后的光波滤出来,从而实现了滤波作用。声吸收带 1 和 5 是为了保证声波在声波导中以行波形式传播而加在声波导两头的胶带<sup>[5]</sup>。经过 TE 通偏振器 6 出来的光用 PIN 接收,得到的光信号功率输入计算机,同时用计算机控制信号发生器在一定范围内进行频率扫描,将声波频率  $f$  和 PIN 接收到的光功率  $I$  分别作为  $x$  轴和  $y$  轴作图,就得到了如图 3 右下角所示的 AOTF 滤波特性曲线图。温度一定时,特性曲线有一定的中心频率  $f_c$ ,它所对应的声波刚好和输入的单色光发生位相匹配,从而在 PIN 中接收到的光功率最大,而不满足位相匹配时,PIN 中接收到的光功率较小。当环境温度变化时,

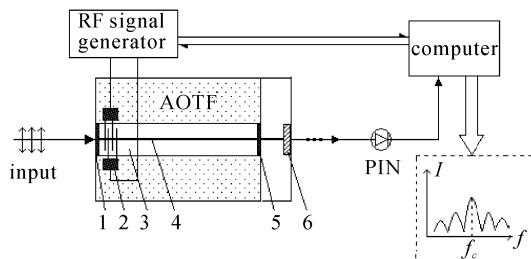


图 3 AOTF 温度传感器结构

1,5: 声吸收带;2: 叉指换能器;3: 声波导;  
4: 光波导;6: TE 通偏振器

Fig. 3 Configuration of AOTF based temperature sensor  
1,5: absorber; 2: inter-digital transducer (IDT); 3: acoustical waveguide; 4: optical waveguide; 6: TE-pass polarizer

所得的滤波特性曲线的中心频率  $f_c$  会发生相应的频移。因此根据得到的中心频率就可以准确地确定当前的环境温度。

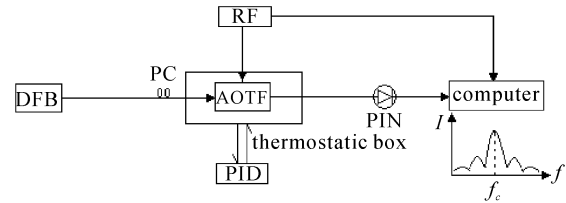


图 4 AOTF 温度传感器实验装置图

PC: 偏振控制器;RF: 射频信号发生器;PID: 温度控制器

Fig. 4 Experimental setup of AOTF based temperature sensor

PC: polarization controller; RF: signal generator;  
PID: temperature controller

整个实验装置如图 4 所示,DFB 激光器产生波长为  $1574 \text{ nm}$  的单色性极好的激光作为系统的输入光,恒温箱内的真实温度由精确度很高的 PID 温度控制器得到(能精确到  $0.001^{\circ}\text{C}$ )。实验中用的是实验室自行研制的已经成品化的共线型声光可调谐滤波器,整个器件是依赖于偏振的,正如图 4 所示,AOTF 左侧有偏振控制器 PC。在计算机最后作出的“光功率-声频”( $I-f$ ) 曲线图中有一个峰值,这个峰值对应的频率就是和  $1574 \text{ nm}$  的光波形成位相匹配的声波的频率,也就是 AOTF 滤波特性的中心频率  $f_c$ 。当恒温箱的温度受到温度控制器 PID 的控制而发生改变时,滤波特性的中心频率  $f_c$  也会发生相应的改变,具体情况是温度上升时,中心频率下降,而温度下降时,中心频率上移。

限于实验条件,本文只测量了在固定光波波长情况下  $16^{\circ}\text{C}$  到  $39^{\circ}\text{C}$  这一相对小范围内 AOTF 滤波特性的中心频率随温度的变化,测量温度的步长为  $0.05^{\circ}\text{C}$ 。最后得到温度值和相应温度下 AOTF 的中心频率值两组数据,实验结果如图 5 所示。可以看出实验结果与理论计算吻合得很好,但相比于理论计算的结果还存在一些小的偏差,我们认为主要有两个原因:1) 由于实验条件有限,实际温度的测量精度难以把握,导致数据精度降低;2) AOTF 的滤波特性对其他环境因素的变化也特别敏感,包括射频的功率和光纤的布线等。因此,可以认为考虑了误差范围后的实验结果和理论计算是一致的。对实验结果进行拟合,结合理论计算结果,就可以得到温度和中心频率的关系式为

$$T = -17.010f_c + 2925.927 \quad (5)$$

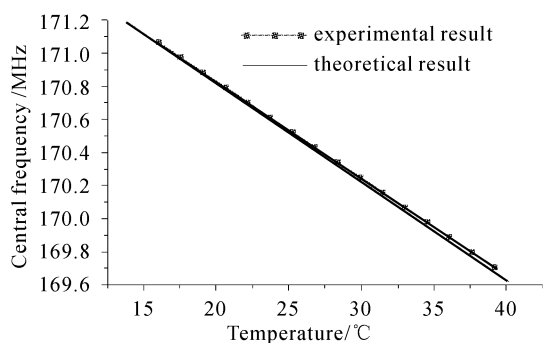


图5 实验得到的温度和 AOTF 的中心频率的关系曲线

Fig. 5 Experimental values of central frequency versus temperature

对于大范围的温度探测,方法也是一样的,只是不能再将温度和 AOTF 的中心频率的关系视为线性,而应该将所得理论曲线用公式进行拟合,并结合实验数据,才可以得到基于 AOTF 的温度传感器的温度和中心频率之间的关系式。

#### 4 分析与讨论

整个实验系统中,信号发生器的输出信号偏差、最终的频率测定偏差和声光可调谐滤波器(AOTF)的带宽等因素一起决定了温度传感器的测温精度。实验中所用的信号发生器的最大输出偏差为  $1.0 \times 10^{-5}$  MHz,并且所用的高精度 GPIB 数据采集卡保证了系统最终的频率测定偏差不得超过  $1.0 \times 10^{-6}$  MHz。根据分析,在这种极小频偏的情况下,可以不考虑以上两因素对测温精度的影响。这样,声光可调谐滤波器(AOTF)的带宽水平就决定了温度传感器的测温精度。由公式  $\lambda = \frac{V_a}{f_a} \Delta n$  可得  $\Delta \lambda = -$

$\frac{V_a \Delta n}{f_a^2} \Delta f_a$ ,代入常温下的常量  $V_a, f_a, \Delta n_0$ ,可以计算得到声频变化 1 MHz 对应的光波长变化为 8.7 nm。本文实验中使用的 AOTF 是实验室自行研制的,3 dB 带宽为 1.6 nm,这已经达到了较高的水平,但还是不够窄,这一带宽对应的声波频率为 0.184 MHz。若按照通常办法以滤波特性曲线 3 dB 带宽的百分之一作为滤波器可分辨的最小峰值间隔,那么这儿的滤波器能分辨的滤波特性曲线的峰值间隔最小值为 0.016 nm,对应的声波频率为 0.00184 MHz。根据前面的理论计算可知当温度变化 1°C 时,相应的滤波特性曲线的峰值频率变化 0.0834 MHz,据此可以算得理论上研制出的温度传感器最

小能精确到 0.022°C,这已经达到了很高的精度。但对于精度要求更高的温度测量,这显然还不够。通过前面的分析可知当这种温度传感器的精度达到 0.001°C 时,要求滤波特性曲线的 3 dB 带宽为 0.073 nm。实验证明,通过增加声光相互作用的距离,并将多个 AOTF 级联使用的方法完全能够将滤波特性曲线的带宽减小到这样的水平,并且器件的稳定性将会越来越好;同时保证信号发生器的输出偏差和系统最终的频率测定偏差都保持在不大于  $1.0 \times 10^{-5}$  MHz。这样,基于 AOTF 的温度传感器的精度将能达到 0.01°C 甚至 0.001°C 的水平,而且其性能也会越来越稳定。

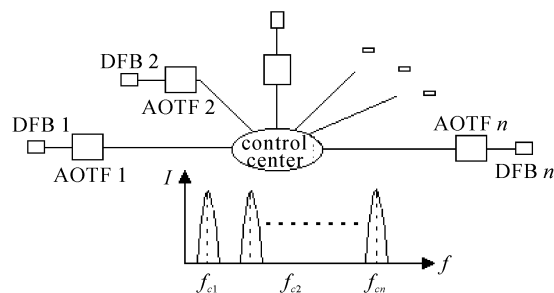


图6 分布式 AOTF 温度传感器组结构设计示意图

Fig. 6 Schematic configuration of distributed AOTF based temperature sensors

另外,基于 AOTF 的温度传感器能够做成分布式的形式,使得能够在一个中心地点对多点的温度进行集中监控,其示意图如图 6 所示。在各个地点装置不同波长的 DFB 激光器,经过在中心监控位置对整个频率范围扫频后,可以得到如图中所示的光功率-频率 ( $I-f$ ) 图,显然,在图中会出现和 DFB 激光器个数相一致的多个峰值,计算机找出它们的中心频率后就可以确定相应频段所对应地点的温度值。在这个过程中,注意要根据实际情况为每个地点分配足够宽的声频频段,以免最后作出的图会出现峰值重叠的情况而导致无法准确判断温度发生变化的地点。

#### 5 结论

基于 AOTF 的新型温度传感器具有很好的性能,测温范围在  $-40^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$  之间,精度能达到 0.001°C,同时能做成分布型的温度传感器组,进行远程集中监控。这些优点使它能在高精度和分布式温度传感领域具有重要的应用价值,在传感产业迅猛发展的大背景下,相信会有很好的发展前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yong, Liao Yanbiao, Xin Jun *et al.*. Optimization of a practical birefringence fiber-optic temperature sensor [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(1):87~92 (in Chinese)
- 2 Shen Weiming, Zhang Yi. Theoretical model for optical fiber temperature sensor with refractive index sensitive to temperature [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(12):1741~1745 (in Chinese)
- 3 Zhang Ying, Guan Baiou, Dong Xiaoyi *et al.*. A novel fiber grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature based on prestrain technique [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A28**(8):729~731 (in Chinese)
- 4 Shen Yonghang. Sapphire fiber thermometer ranging from the room temperature to 1800°C [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(1):83~87 (in Chinese)
- 5 Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng *et al.*. Guided-wave Optical Sensors; Theory and Technology [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1998 (in Chinese)
- 6 Xue Ting, Qi Fang, Hu Hongzhang *et al.*. Development of integrated optical acoustooptic tunable wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(8):1095~1099 (in Chinese)
- 7 Hu Hongzhang, Ling Shide. Applied Optics Principle [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993 (in Chinese)
- 8 Tadao Nakazawa, Shinji Tanjguchi, Minoru Seino *et al.*. Ti:LiNbO<sub>3</sub> acousto-optical tunable filter (AOTF) [J]. *Fujitsu Sci. & Tech. Journal*, 1999, **35**(1):107~112



## 第八届国际光电子和通信会议在上海举行

由中国科学院上海光学精密机械研究所、上海交通大学和上海市通信学会、上海市激光学会、上海市通信制造行业协会共同组织举办的第八届国际光电子和通信会议(OECC'2003)于2003年10月13~16日在上海国际贵都大酒店举行。来自日本、韩国、澳大利亚等23个国家和地区的近400名代表参加了会议。会议收到论文436篇,其中特邀报告和辅导报告共75篇,口头报告244篇,张贴报告117篇。大会论文集已由《光学学报》以增刊的形式出版。

开幕式由大会主席、上海市通信学会秘书长陈皆重博士主持,大会主席、中国科学院上海光学精密机械研究所所长朱健强研究员致开幕词,大会主席、上海交通大学陈益新教授介绍了国际光电子和通信会议的历史和本届大会组织情况,上海市科委主任李逸平代表市政府对大会的胜利召开表示祝贺。来自中国、香港、日本、韩国、印度和法国的6位作者获得了本次会议的优秀论文奖。

开幕式后,安排了三个大会报告。首先是来自中国工程院的邬贺铨教授作了题为“The Situations and Prospects of Broadband Network in China”的报告,随后是来自香港中文大学的Lin Chenlon教授作了题为“Photonics for Broadband Communications—Past, Present and Future”的报告,最后是来自日本NTT Access Service System

Labs的Sinohara Hiromichi博士作了题为“FTTH in Japan”的报告。

会议设6个分会场,在为期两天半的分会讨论中,代表们就6大类45个专题方向进行了广泛的交流。内容涉及:光纤、光缆和测量,无源器件和组件,有源器件和组件,光学传输系统和子系统,光学网络和管理,生物医学光子学,光纤传感器以及其他应用。会议期间国内9家从事相关产品研发和生产的公司和厂商还举办了光电子产品展示会。

国际光电子和通信会议是亚太地区光通信领域最重要、最具影响的国际学术会议。会议宗旨是为各国光电子和光通信领域的专家学者提供一个交流新思想和新成果的学术平台。自1996年开始,OECC会议在日本和亚太地区其他国家轮流召开。本届学术会议规模大,专业范围广,是一个高水平的国际学术会议。

与会代表利用会议间隙游览了黄浦江,亲身感受了蓬勃发展的上海。会后部分代表还根据自己的专业研究领域,分别赴中国科学院上海光学精密机械研究所、上海大学、上海交通大学和江苏法尔胜光子有限公司等单位参观访问。

为期4天的会议取得了圆满成功。下届国际光电子和通信会议将在日本举行。

(童 菲)