

文章编号: 0258-7025(2003)07-0629-04

集成光学声光可调谐滤波器的温度特性 及其精密数字控制

唐多强¹, 张海斌¹, 胡鸿璋¹, 林林¹, 耿凡²

(¹ 天津大学理学院应用物理学系, 天津 300072; ² 中国航天机电工业总公司 8358 所, 天津 300192)

摘要 声光可调谐滤波器(AOTF)是波分复用(WDM)网络中的关键器件之一,它的一个重要技术指标是中心波长的稳定性。针对以LiNbO₃为基底的集成光学AOTF,从理论上分析了它的中心波长随温度的漂移,计算表明该漂移值达0.8 nm/°C。设计制作了一套高性能的比例、积分、微分(PID)温度控制系统,实际测定了AOTF系统的温度特性。结果表明,理论计算和实验完全一致。利用这套系统,成功地将AOTF的温度控制在±0.1°C,将中心波长的漂移控制在±0.08 nm的范围内,保证了器件在光纤通讯系统中的实际应用。

关键词 光电子学;声光可调谐滤波器;有效折射率;温度控制

中图分类号 TN 713 文献标识码 A

Temperature Property of Integrated AOTF and Its High Accuracy Digital Control

TANG Duo-qiang¹, Zhang Hai-bin¹, HU Hong-zhang¹,
LIN Lin¹, GENG Fan²

(¹Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
(²8358 Institute of CASC, Tianjin 300192, China)

Abstract As the key component in the WDM network, the acousto-optic tunable filter (AOTF) is broadly used in the field of optical communications and optical interconnections. But an obstacle in its application is its frequency draft along with the change of the temperature. In this paper, the temperature property of the AOTF has been analyzed theoretically. The calculation shows the temperature draft of 0.8 nm/°C. Additionally, a set of PID temperature control system is fabricated, to successfully stabilize the temperature of the AOTF within ±0.1°C. The temperature property of AOTF is also measured by the PID system. The results agreed with the theoretical analysis very well.

Key words optoelectronics; acousto-optical tunable filter (AOTF); effective index of refraction; temperature control

1 引言

集成光学声光可调谐滤波器(AOTF)是波分复用(WDM)光网络中的关键器件之一,它的滤波作用是基于光波导中的TE模和TM模通过声光耦合相互转换^[1]。决定滤出波的中心波长的位相匹配条件与TE, TM模光波的有效折射率差密切相关,而

铌酸锂(LiNbO₃)晶体的折射率对温度变化比较敏感^[2],因此,当声光可调谐滤波器工作时,由于环境温度的变化以及自身吸收声表面波等作用,使器件的温度升高,会导致中心波长漂移。本文针对这个问题,计算了温度变化与双折射率变化的关系,分析了它对中心波长变化的影响,并设计制作了一套高性能的比例、积分、微分(PID—proportional-

收稿日期:2002-03-07;收到修改稿日期:2002-12-09

基金项目:国家自然科学基金(No. 10084001)资助项目。

作者简介:唐多强(1947.2—),男,教授,主要从事计算机在光学应用方面的研究。E-mail:tdq@eyou.com

intergral-differential) 温度控制系统, 实际测定了 AOTF 系统的温度特性。

2 理论分析

在集成光学 AOTF 中, 滤出波的中心波长 λ_0 由位相匹配条件^[1] 决定

$$N_{TM} - N_{TE} = \frac{\lambda_0}{v_a} f_a \quad (1)$$

式中, v_a 为声表面波的速度, 在我们研制的声波导材料中, $v_a \approx 3651$ m/s; f_a 为声表面波的频率; N_{TM} 和 N_{TE} 分别为光波导中 TM 模和 TE 模的有效折射率。它们主要决定于 LiNbO₃ 晶体的主折射率 n_o 和 n_e , 也与光波导的工艺参数有关。

图 1 表示在 X 切 Y 传的 LiNbO₃ 晶片上用钛扩散的方法制作的光波导的横截面。在光波导上还覆盖有一层作为声波导的氧化物 (SiO₂/InO) 薄膜, 厚度 d 为 0.2 μm 。这样的波导结构在 X 轴方向上可以近似地看作四层平板波导。用 n_2 和 n_4 分别代表氧化物薄膜和空气的折射率, n_3 和 n_1 分别表示铌酸锂基底和钛扩散波导中的折射率, 则有

$$n_1 = n_3 + \epsilon \quad (2)$$

表 1 公式(3)所用参数

Table 1 Parameters used in the equation (3)

i	A	B	C	D	E	F	G
o light	4.9130	0	1.173×10^5	1.65×10^{-2}	2.12×10^2	2.7×10^{-5}	-2.78×10^{-8}
e light	4.5567	2.605×10^{-7}	0.97×10^5	2.70×10^{-2}	2.01×10^2	5.5×10^{-5}	-2.24×10^{-8}

设光波导的深度为 a , 利用边界条件解 Maxwell 方程组, 可以得到非对称四层平板波导的模式本征方程^[4]

$$\kappa_1 a = \tan^{-1} \left(\eta_{14} \frac{p_4}{\kappa_1} \right) + \tan^{-1} \left\{ \eta_{12} \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \tan \left[\tan^{-1} \left(\eta_{23} \frac{p_3}{\kappa_2} \right) - \kappa_2 d \right] \right\} \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} \kappa_1^2 = k_0^2 n_1^2 - \beta^2 \\ \kappa_2^2 = k_0^2 n_2^2 - \beta^2 \\ p_3^2 = \beta^2 - k_0^2 n_3^2 \\ p_4^2 = \beta^2 - k_0^2 n_4^2 \end{cases} \quad n_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{TE 模} \\ \frac{n_i^2}{n_j^2} & \text{TM 模} \end{cases}$$

其中, $n_2 = 1.8, n_4 = 1, \beta = k_0^2 N_{\text{eff}}^2$ 为传播常数, N_{eff} 为模的有效折射率。针对不同的温度, 分别对 TM 模和 TE 模解上述超越方程, 就可得到不同的温度时 TM 模和 TE 模的有效折射率 N_{TM} 和 N_{TE} 。计算所得

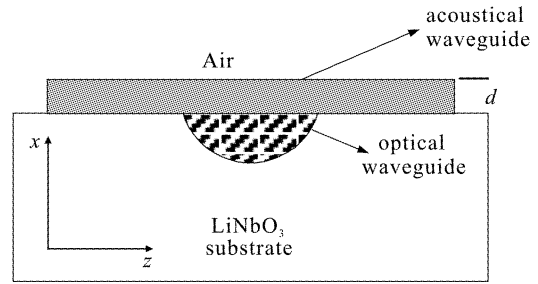


图 1 光波导截面示意图

Fig. 1 Intersection of the optical waveguide

式中 ϵ 表示由于钛扩散引起的折射率增量。对于 TM 模 (o 光), n_3 等于 o 光的折射率 $n_o, \epsilon = 0.005$; 对于 TE 模 (e 光), n_3 等于 e 光的折射率 $n_e, \epsilon = 0.011$ 。铌酸锂的主折射率对温度变化是敏感的, 它们与晶体温度的关系可表示为^[3]

$$n_i^2(\lambda, T) = A_i + B_i T^2 + \frac{C_i + D_i T^2}{\lambda^2 - (E_i + F_i T^2)^2} + G_i \lambda^2 \quad i = o, e \quad (3)$$

式中 T 为晶体的温度, 单位为 K, λ 为光波波长, 单位为 nm。上述关系对于波长从 400~4000 nm, 温度从 0~400°C 均成立。其中所用到的参数见表 1。

的 $\Delta n - t = N_{TM} - N_{TE}$ 随温度的变化如图 2 所示。再利用公式(1), 并取 $f_a = 173.5$ MHz, 就可得到中心波长随温度的变化, 由图 2 可见, 温度每变化 1°C, 中心波长漂移为 0.80 nm。对于相邻信道间隔

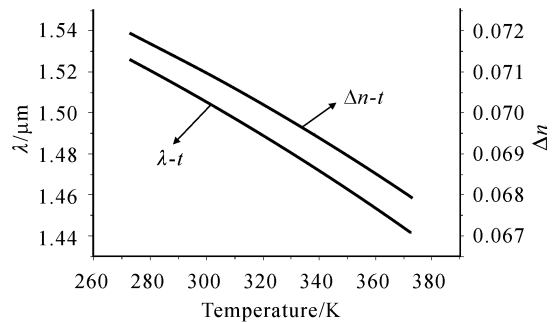


图 2 AOTF 滤出的中心波长随温度的变化
Fig. 2 Central frequency draft along with the change of temperature

是 0.8 nm 的密集波分复用(DWDM)网络,温漂将造成严重的信道间串扰,因此温控的精度至少要达到 0.1℃。

3 PID 数字温度控制系统和实验

设计的温度控制系统如图 3 所示。整个系统由温度传感器(Pt100),SR253 型 PID 智能控制器,外接放大电路,半导体制冷器,滤波器固定装置和散热片等部分组成^[5,6]。由温度传感器测量温度变化作为 PID 智能控制器的信号输入,由 PID 产生智能输出信号,经由放大电路放大,输出控制电流作为半导体制冷器的电源,以达到精密控温的目的(SR253 PID 的测控精度可达到 0.01℃)。利用紫铜材料,加工了一个类似恒温箱的装置(图 4),将滤波器置于紫铜热沉之上,并在中间涂抹导热硅脂,以使热量能够良好地传导。半导体制冷器所产生的热量通过散热片散发,必要时可以增加风扇。

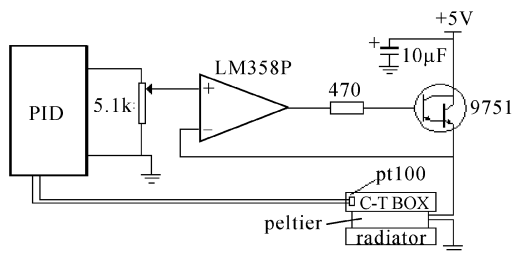


图 3 控温系统结构图

Fig. 3 Structure of the temperature control system

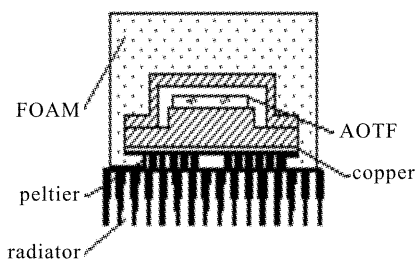


图 4 恒温箱截面图

Fig. 4 Intersection of the temperature control box

利用控温系统中的 Pt100 温度传感器,首先测定了未加温度控制时器件的温度随时间的变化曲线(如图 5)。从图 5 可以看出,温度变化在声波开启和关闭时最为激烈。温度上升达到稳定大约需要 40 min,而关闭声波后温度达到稳定需要 20 min 左右。这样长的稳定时间对器件的实用性有很大的限制。另外,器件的实际应用也要求器件开关时具有稳定性。设计的温控装置就是要解决上述问题。

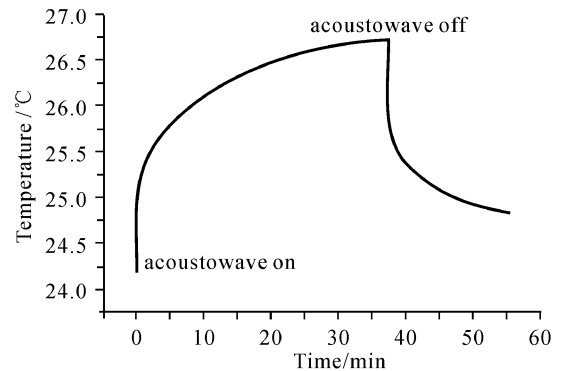


图 5 声波开关后晶片温度随时间的变化

Fig. 5 Temperature draft dependence on the on/off of the acousto-wave

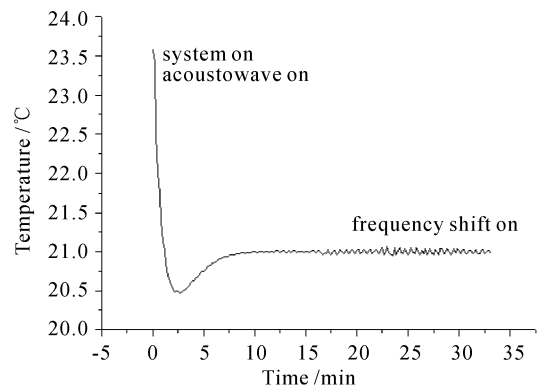


图 6 温度控制实验结果

Fig. 6 Experimental results of the temperature control system

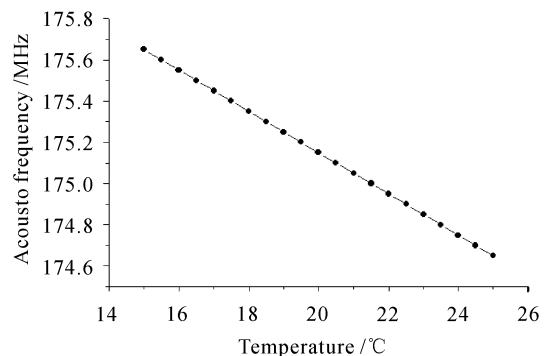


图 7 声波中心频率随温度的变化

Fig. 7 Dependence of the central frequency of acoustic wave on the temperature

为检验温度控制系统的实际效果,进行了两个步骤的实验。首先,进行控温系统在室温下的温度控制能力的实验。实验时的环境温度为 23.5℃,设定温度 21℃,预期温度控制精度为 ±0.1℃。适当地调节 PID 的设定参数,声波和温控同时作用在系

统后,经过约 6 min 后系统稳定到设定温度,并在该温度附近震荡,振幅小于 0.1°C ,达到预期控温目的。然后,为了解决声波开关时的温度震荡,引入了频率移动温度补偿的方法,即用加载频率在工作带宽以外的声波来模拟声波关闭的情况。这样,由于声波与工作带宽内的任何频率的光波都不匹配,整个器件相当于已经关闭,但由于继续有声波作用,器件的温度不会有大的波动。经过匹配,叉指换能器的工作带宽大约有 10 MHz 左右,而一般的通讯应用(信道间隔 0.8 nm)是不会采用如此宽的带宽的。因此,采用距离中心频率为 10 MHz 的声波来进行温度补偿,解决了器件开关对性能的影响。此方案的实验结果如图 6 所示,系统从开始到稳定需 6~7 min 左右,之后系统在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 范围内震荡。其后,采用频移补偿方法,相当于器件已经关闭,实验显示其结果十分良好,温度的震荡仍然在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 范围之内,达到实际要求。

利用温控系统,实际测量了 AOTF 的温度特性。为了避免使用宽带光源和频谱分析仪,采用一种等价的方法,即固定输入光波的波长不变($\lambda = 1.523 \mu\text{m}$),改变驱动声波的频率,测得不同温度时的中心频率,如图 7 所示。由图可见,当温度变化 1°C ,声波的中心频率变化 0.1 MHz。再利用式(1),换算成当声波频率固定时不同温度下滤出的中心波长,结果也画在图 2 中。可见,与理论计算的

结果吻合。理论计算和实验都表明,当器件的温度控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 时,光波中心波长的变化不超过 $\pm 0.08\text{nm}$,即可满足 WDM 系统需要。因此,我们设计的温度控制系统很好地解决了 AOTF 中心波长稳定性的问题。

参 考 文 献

- 1 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)
- 2 Yi C. B., Gong Y., Song W. J.. The study on Pt100 type platinum resistance temperature transmitter [J]. *Automation Instrument* (自动化仪表), 1998, **19**(9):9~10 (in Chinese)
- 3 Yu. B. Boyibrokin. Handbook of Laser Technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. 230 (in Chinese)
- 4 J. X. Fang. Fundamental Principles of Optical Waveguide Technique [M]. Shanghai: Publishing House of Shanghai Jiaotong Univesity, 1987. 38 ~ 39 (in Chinese)
- 5 Yu F. Sh., Ai X., Li Sh. Q.. Design for high-power laser-diode accurate temperature control of Fuzzy + PL system [J]. *Tech. of Measurement and Control* (测控技术), 2000, **19**(9):31~33 (in Chinese)
- 6 Fabrizio B., Enrico Calloni, Aniello Grado. High accuracy digital temperature control for a laser diode [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(8):4051~4054