

高精度温控可调光栅滤波器的设计

陈福昌 余超群

(闽南师范大学物理与电子信息工程系, 福建 漳州 363000)

摘要 设计了一个高精度温控可调光栅滤波器。采用铝槽对光纤光栅进行封装,使光栅免受应变作用,然后使用高精度温控模块对铝槽封装的光栅进行温度控制,从而实现保持光纤光栅中心波长长期稳定的目的。该光纤滤波器温控模块采用三块温控芯片 MAX1978 并行工作的方式提高温控效果,温控精度可达 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,动态范围 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 连续可调。在不同环境温度下测试光栅稳定性,光栅中心波长标准差为 0.0016 nm 。实验结果证明了该设计的可行性。

关键词 测量;温度控制;光栅可调滤波器;铝槽封装

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.111202

Design of Tunable Grating Filter Based on High-Precision Temperature Control

Chen Fuchang Yu Chaoqun

(Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

Abstract We present a design of tunable grating filter based on high-precision temperature control. We use aluminum groove to encapsulate the grating so that it is insusceptible to strain. Then we design a high-precision temperature control module composed of 3 pieces of temperature control chips MAX1978 working in parallel to monitor and control the temperature of aluminum groove, thus achieving the long-term stability of center wavelength of the tunable grating filter. The temperature accuracy can reach $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, with the dynamic range of $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ continuously adjustable. The tunable grating filter based on this temperature control module can reach 0.0016 nm wavelength stability at center wavelength. The experimental results confirm the configuration's feasibility.

Key words measurement; temperature control; tunable grating filter; aluminum groove encapsulation

OCIS codes 120.2440; 120.3940; 050.2770

1 引言

光纤光栅因具有体积小、质轻、抗电磁干扰能力强、寿命长、复用性好、远距离实时监控等特点^[1]而广泛应用于光纤激光器、光纤通信和光纤传感器等领域^[2-4],且随着制备工艺的日趋成熟,近几十年来已成为发展最为迅速的光纤无源器件之一。在上述应用中,光纤光栅作为关键组件,主要起波长选择的作用。光纤光栅的中心波长对温度和应变敏感^[5],环境温度改变或拉伸应力作用将引起光栅中心波长漂移,从而影响光栅滤波器工作的稳定性。在光纤激光器中,光栅作为选频元件,光栅中心波长漂移将直接影响激光的输出功率和输出波长,并可能在短间隔内产生不利于系统稳定工作的“跳模”现象^[6];在光纤通信中,密集型波分复用器每个通道带宽可低至 0.2 nm ,须通过光栅严格控制每个通道的波长,保证光栅中心波长长期稳定才能避免通信过程中通道信号间的混叠与串扰^[7];在布里渊光纤传感系统中,布里渊信号与瑞利信号波长相差约 0.1 nm ,采用窄带滤波光栅进行信号提取时,光纤中心波长任何小的偏差都将导致布里渊信号强度急剧降低,影响传感系统测量精度^[8]。由此可见,在光纤光栅的广泛应用中,保持光栅中心波长长期稳定具有重要

收稿日期: 2013-05-23; 收到修改稿日期: 2013-07-21; 网络出版日期: 2013-10-10

基金项目: 福建省教育厅基金(JB12143)、2012 闽南师范大学校杰青计划(SJ12001)

作者简介: 陈福昌(1984—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: ouch27@163.com

意义。

如何解决中心波长的漂移问题已成为光纤光栅应用领域的技术关键。理论与实验证明,采用温度控制的方法来保证光纤光栅所处温度恒定,可保持光栅中心波长稳定不变^[8]。同时,当光栅中心波长与所需波长有一定偏差时,也可通过调节光栅温度来达到使光栅中心波长与所需波长一致的目的。

有文献报道^[9],采用温控电路对半导体激光管进行温度控制,激光输出波长稳定度约 0.005 nm,而不加温控的激光输出波长随环境温度变化,约 0.1 nm/°C。由此可见,温控在保持激光输出波长稳定方面起到了重要作用。目前,一些小型温控模块由内置比例积分微分(PID)控制算法的高精度温控芯片和少许外围电路组成,在-40 °C~70 °C范围内,温控精度为 0.1 °C,若环境温度不变,温控精度可达 0.005 °C^[10]。本文设计的高精度温控可调光栅滤波器系统中,采用三块温控芯片 MAX1978 并行工作的方式,实现了一个高精度可调温度控制模块,该模块用于调节铝槽封装的光纤光栅温度,可使之快速进入稳定状态,进而达到保持光栅中心波长长期稳定不变的目的。

2 温控可调光栅滤波器的设计原理

对于光纤布拉格光栅(FBG),光栅反射中心波长与光栅周期和有效折射率相关,表达式为^[11]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_B 为光栅中心波长, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为光栅周期。

当光栅受到外界应力作用时,光栅周期会发生变化,同时,光弹效应会使光栅有效折射率变化;当光栅受到外界温度影响时,热膨胀会使光栅周期发生变化,同时,热敏效应也会导致光栅有效折射率变化^[12]。由此推导出的光栅中心波长随外界温度和应力的变化关系式为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{eff}}}\zeta\right)\Delta T + (1-P)\epsilon, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 为光栅中心波长变化量, ΔT 为温度变化量, ϵ 为轴向应变变量, α 为热膨胀系数, ζ 为热光系数, P 为有效弹光系数。

(2)式表明,应变和温度是直接改变光栅中心波长的物理量,因此可调光栅滤波器的设计一般有应变调节和温度调节两种方法。应变调节通过对光栅的拉伸作用,改变光栅结构从而改变光栅中心波长。该方法不足之处在于,在环境温度改变的情况下,光栅结构会由于热胀冷缩发生变化,导致光栅的中心波长漂移,影响滤波光栅的稳定工作。温度调节可在采取一定措施保证光栅免受应力作用的基础上,对光栅温度进行恒定控制,从而达到使光栅中心波长保持稳定的目的。

本文采用对光栅进行铝槽封装的方法,使光栅免受外界应力作用,然后使用高精度温控模块对封装铝槽进行温度控制,即对铝槽内的光栅进行温度控制。如此,一方面可通过调节光栅温度来改变光栅中心波长;另一方面,可通过恒温控制来保证光栅中心波长不变。

在不考虑应变的前提下,光栅中心波长随温度变化关系如下:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{eff}}}\zeta\right)\Delta T. \quad (3)$$

若光栅经铝槽封装,因铝的热膨胀系数比光栅大,光栅将随铝槽的热胀冷缩保持同步变化,其中心波长随温度变化关系为^[13]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{eff}}}\zeta\right) + (1-P)(\alpha_{\text{Al}} - \alpha)\right]\Delta T, \quad (4)$$

式中 α_{Al} 为铝的热膨胀系数。其中光栅中心波长变化由两部分组成,一部分是温度变化本身引起的波长变化 $\left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{eff}}}\zeta\right)\Delta T$,另一部分是因光栅与铝槽热膨胀系数不同而导致光栅产生应变引起的波长变化 $(1-P)(\alpha_{\text{Al}} - \alpha)\Delta T$ 。

从(4)式可以看出,经铝槽封装后,为使光栅中心波长保持稳定不变,只需保证封装铝槽的温度不变。因此,在采用温控方法实现的高精度温控可调光栅滤波系统设计中,系统的关键在于如何完成高精度可调温度控制模块的设计。

3 温控可调光栅滤波器的设计实现

3.1 温控电路设计

温控电路系统是本文所述高精度温控可调光栅滤波系统的核心组件,主要包括微控制单元单片机及其外围电路和 MAX1978 温控电路。图 1 为整个温控电路系统框图,其中温度设置采用高精度电位器实现,温度的实时采集采用高精度热敏电阻实现,将电位器和热敏电阻组成电桥电路(图 3)。控制过程中,一方面,模数转换器(ADC)将代表设置温度的电位器电压和代表实时温度的热敏电阻电压转换成数字信号送入 MCU,并在 MCU 内部换算成温度,通过液晶显示器(LCD)进行实时显示;另一方面,电位器电压和热敏电阻电压是 MAX1978 温控芯片的控制电压,当两电压不同时,温控芯片驱动热电制冷器(TEC)工作,调节热敏电阻温度,直至两电压相同。缓冲器在系统中的作用是提高电压驱动能力保证三块 MAX1978 并行稳定工作。

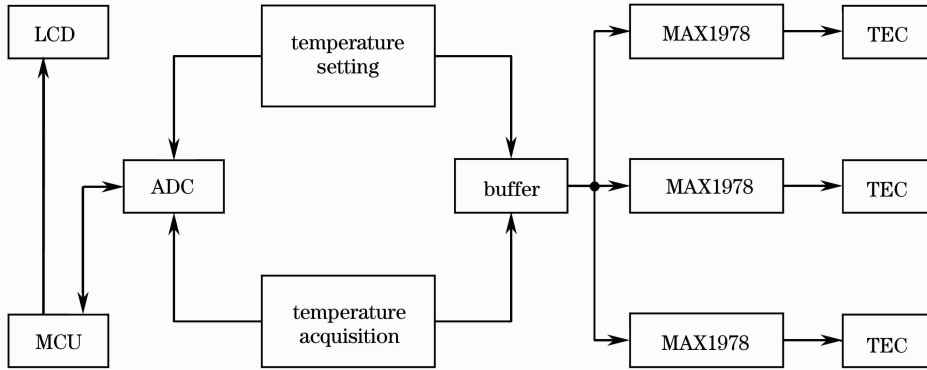


图 1 温控电路系统

Fig. 1 Temperature control circuit system

图 2 所示为单片机系统电路,该电路在本温控模块中的作用是控制 LCD 和 ADC 的正常工作。单片机采用 STC11F16XE,该单片机输入输出(IO)接口丰富,可根据不同器件的工作时序同时控制多个外围器件工作。

图 3 所示为 MCP3201 模数(AD)转换电路,其中 ADR431 是一款外加离子注入结型场效应管(XFET)系列基准电压源,主要为 MCP3201、温度设置电位器和热敏电阻提供精确的基准电压,其输出电压为 2.5 V,具有低噪声、高精度和低温漂性能。MCP3201 是一款带有片上采样和保持电路逐次逼近的 12 bit 高精度模数转换芯片,作用是温度设置电位器和高精密热敏电阻实时采集到的电压转换为数字信号,通过单片机换算成温度,在 LCD 进行实时温度显示。该芯片误差最大为 $\pm 2\text{LSB}$ (LSB:最小有效位),采用串行外围设备(SPI)协议与单片机进行通信。

图 4 为温控电路模块。MAX1978 是一款高度集成的高精度温度控制芯片,其片内集成了场效应管和温度管理闭环控制电路,超低漂移斩波放大器可以维持高达 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度稳定性^[10]。该芯片对 TEC 的双向温度控制即使在低负载电流时也不存在控制死区,在温度设置点接近外界温度时,能以极低的加热或制冷电流很好地工作,不会产生震荡。相对于其他温控芯片,该芯片只需极少的外围电路,就能对温度进行高精度控制。

在该温控电路中,将温度设置电压与热敏电阻电压分别连接至 MAX1978 的 FB+ 和 FB- 引脚,将 TEC 制冷片连接至 MAX1978 的 OS1 和 OS2 引脚,当温度设置值与热敏电阻采集得到的实时温度值不同时(FB+ 与 FB- 电压不同),MAX1978 通过决定 TEC 制冷片的电流方向与大小,从而起到温度控制的作用。为提高温度控制效果,该温控模块采用三片 MAX1978 并行工作的方式进行温度控制,将温度设置电压和热敏电阻电压连接至三块 MAX1978。为提高电压驱动能力,电路采用 AD8606 作为电压缓冲器。AD8606 是一款精密、低噪声、轨到轨输入输出的双路单电源互补金属氧化物半导体(CMOS)运算放大器,单位增益稳定,完全满足电压缓冲器的要求。

为测试此温控电路性能指标,做两组实验:一组在室温($27\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,调节温控温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内

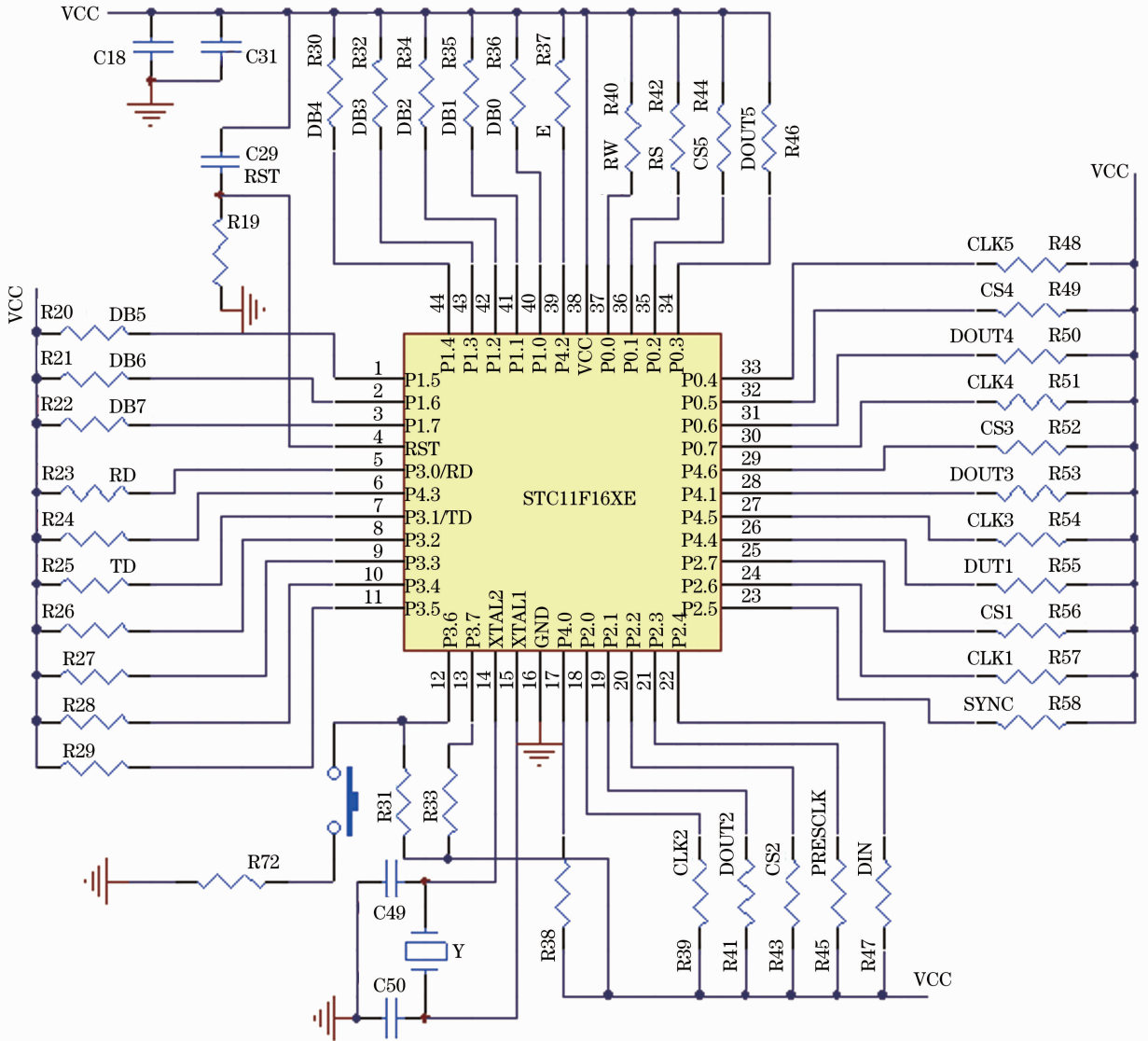


图 2 单片机系统连接电路

Fig. 2 MCU system connecting circuit

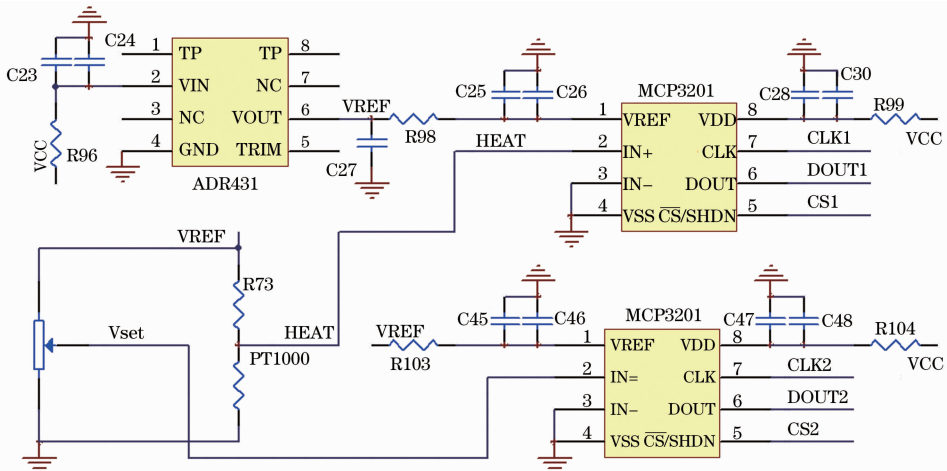


图 3 MCP3201 模数转换电路

Fig. 3 MCP3201 analog-to-digital conversion circuit

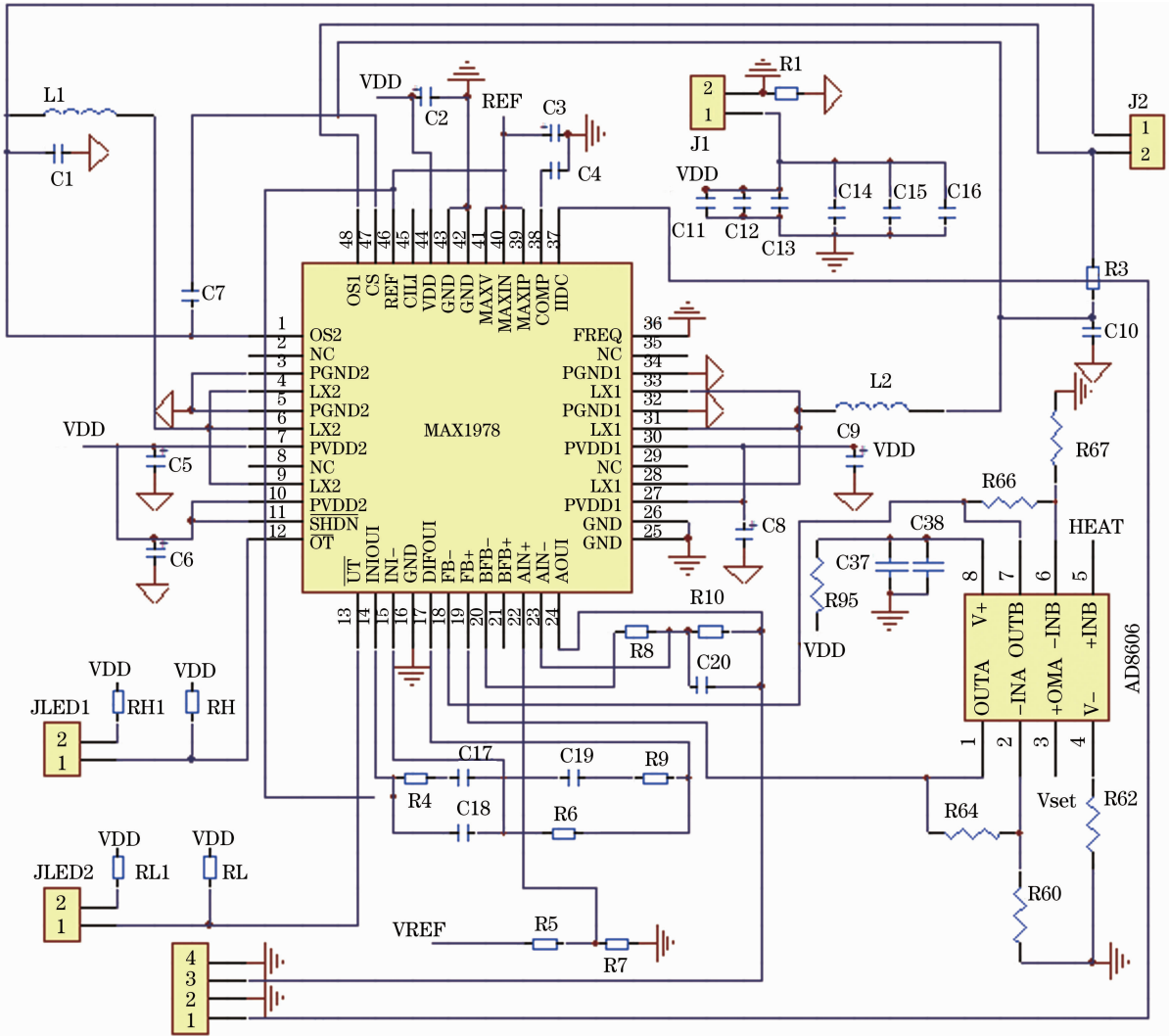


图4 温控电路模块

Fig. 4 Temperature control circuit module

变化,测试其在室温下的温度控制效果;另一组温控模块设置为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,将其放入恒温箱模拟环境温度变化,调节恒温箱温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化,测试其不同环境温度下的温控能力。两组实验测得数据如图 5、6 所示。由图 5 可知,在室温下,温控模块可在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行调节,且温控精度优于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;由图 6 可知,环境温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时,温控精度约 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 光纤光栅的铝槽封装

光纤光栅的铝槽封装如图 7 所示,将带宽为 0.09 nm 的窄带光栅用环氧树脂封装在一个刻有 V 型细槽的铝条内,该铝条大小为 $100\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,V 型槽宽度为 1.2 mm ,槽与铝条中轴平行,铝条材质为铸造铝合金。封装时,尽可能保证光栅贴近 V 型槽底部轴线上,将窄带光栅拉直,光栅两端用环氧树脂固定。为保证铝条与光栅温度实时同步,在光栅部位注入导热硅胶。封装后,铝条底部平行放置三块制冷片并用铝合金散热片进行散热。

4 光栅稳定性分析

4.1 光栅中心波长与温度的关系

将铝条温控至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,将荧光从光栅一端入射,将光栅另一端接入 Anritsu 光谱分析仪 (MS9710A,精度 0.05 nm),观察光谱仪得到的测试结果如图 8 所示。此时,可调光栅中心波长为 1543.402 nm 。调节铝条温度,将温度设置为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,重复上述步骤,得到的测试结果显示光栅中心波长为 1543.556 nm ,光栅中心波长

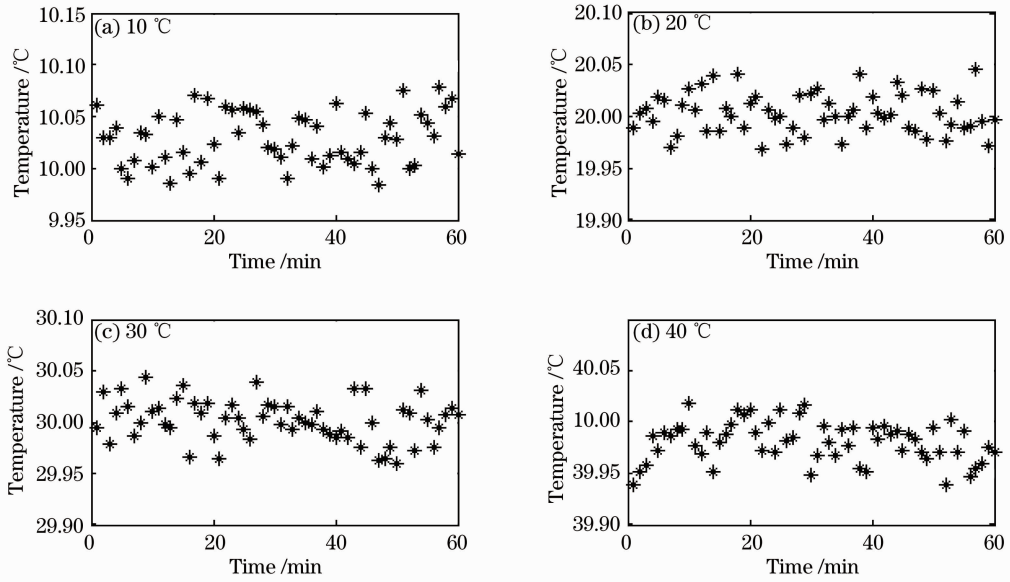


图 5 室温下温控模块调节在不同温度下的温控测试图

Fig. 5 Test of temperature control module set at different temperatures under room temperature circumstance

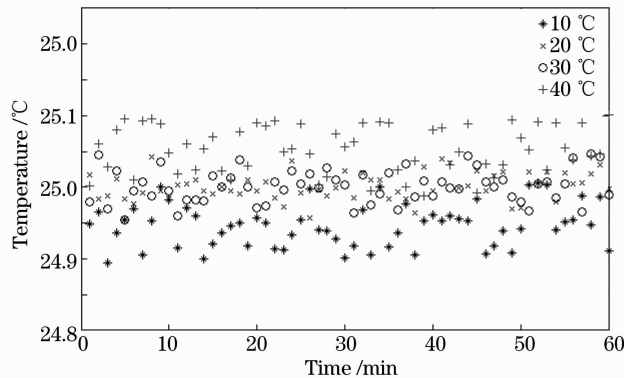


图 6 环境温度变化时温控模块在 25 °C 的温控测试图

Fig. 6 Test of temperature control module set at 25 °C under varying ambient temperature

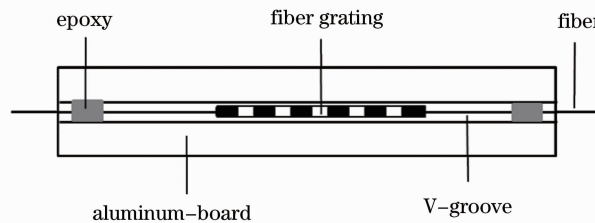


图 7 光栅铝槽封装示意图

Fig. 7 Sketch of aluminum groove encapsulation of grating

偏移了 0.154 nm。

为进一步测试光栅中心波长与温度的关系,将铝条温度分别设定为 10 °C、15 °C、20 °C、25 °C、30 °C、35 °C、40 °C,观察光谱仪中光栅中心波长,各温度下中心波长数据如表 1 所示。将表 1 数据进行拟合如图 9 所示,可知光栅中心波长与温度成正比。拟合公式为

$$\lambda = 0.0331T + 1542.57, \quad (5)$$

式中 λ 为光栅中心波长, T 为摄氏温度。

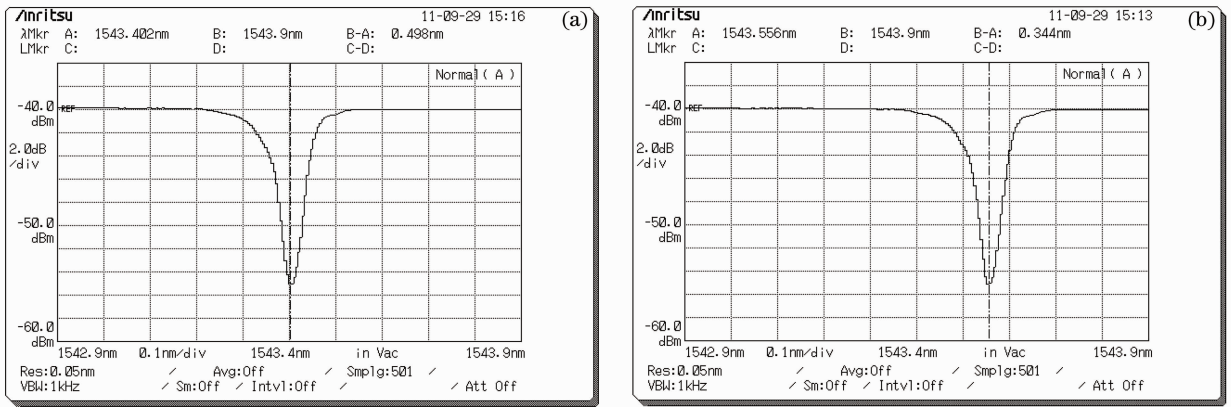


图 8 (a) 25 °C 和 (b) 30 °C 下荧光通过窄带光栅的光谱

Fig. 8 Fluorescence spectra through the narrowband grating at (a) 25 °C and (b) 30 °C

表 1 不同温度下光栅中心波长

Table 1 Center wavelengths of grating at different temperatures

T / °C	Center wavelength / nm
10	1542.902
15	1543.068
20	1543.236
25	1543.402
30	1543.556
35	1543.728
40	1543.896

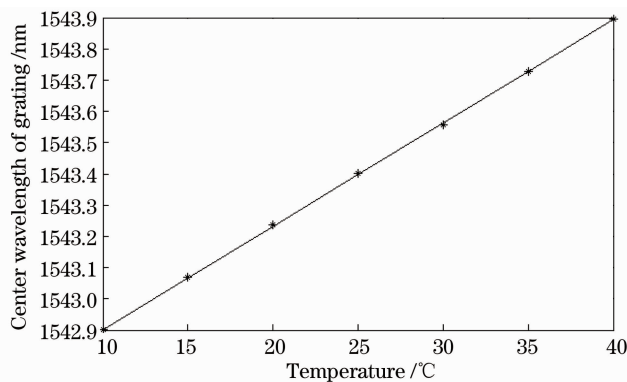


图 9 光栅中心波长与温度的关系

Fig. 9 Relationship between center wavelength of grating and temperature

一般裸光栅的温度灵敏系数约为 $0.0111 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ^[11], 本设计中光栅经过铝槽封装, 温度灵敏度为 $0.0331 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 较之裸光栅灵敏度提高了约 2 倍, 极大提高了可调滤波光栅中心波长的动态范围。

4.2 光栅稳定性测试

为测试该可调光栅滤波器的稳定性, 将光栅温控至 25 °C (中心波长为 1543.402 nm), 并将该可调光栅模块放入恒温箱中模拟环境温度变化, 调节恒温箱温度在 10 °C ~ 40 °C 之间进行变化, 通过光谱仪观测光栅中心波长的变化, 结果如图 10 所示。对测试得到的中心波长数据进行计算, 可得不同环境温度下的中心波长平均值与标准方差, 如表 2 所示。从表 2 可看出, 当环境温度与温控温度不同时, 光栅中心波长会发生轻微漂移, 环境温度升高时, 光栅中心波长轻微增大, 环境温度降低时, 光栅中心波长轻微减小, 并且随着环境温度与温控温度差值的增大, 中心波长漂移增大。测试结果表明该可调滤波光栅是稳定可靠的, 其温度灵敏系数的提高并没有影响滤波光栅中心波长的稳定性。

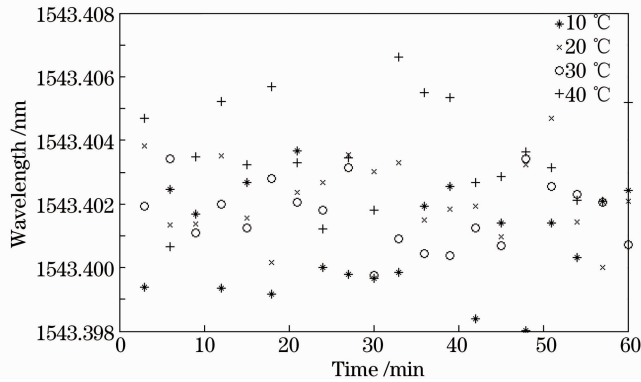


图 10 窄带光栅中心波长的稳定性测试曲线

Fig. 10 Stability test of center wavelength of narrow band grating

表 2 不同温度下中心波长稳定性测试

Table 2 Stability test of center wavelength at different temperatures

$T / ^\circ\text{C}$	Average center wavelength /nm	Standard deviation /nm
10	1543.4008	0.0016
20	1543.4022	0.0012
30	1543.4016	0.0011
40	1543.4038	0.0016

5 结 论

设计了一个高精度温控可调光栅滤波器。该光栅滤波器通过对光纤光栅进行铝槽封装,有效地保证了光栅免受外界应力作用影响;设计的高精度温控模块可对铝槽封装的光纤光栅进行温度控制,通过调节光栅温度,方便、精确地调节窄带光栅中心波长。实验证明,在不同环境温度下,该温控可调光栅滤波器中心波长标准差为 0.0016 nm。该光栅滤波器实现方法简单可靠,工作稳定性高,具有重要的实用意义。

参 考 文 献

- 1 Chengtao Zhang, Jiacheng Hu, Fuchang Chen, *et al.*. Application of high-speed fiber Bragg grating sensing system for safety monitoring of modern ships [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(s2): S20604.
- 2 Yang Fei, Chen Dijun, Pan Zhengqing, *et al.*. Short linear cavity single-frequency fiber laser with active frequency stabilization by fiber Bragg grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0902005.
杨 飞, 陈迪俊, 潘政清, 等. 光纤光栅主动稳频的短直线腔单频光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0902005.
- 3 Li Dongsheng, Sui Qingmei, Jia Lei. Simulation of fiber Bragg grating sensing networks using code division multiplexing and wavelength division multiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): s100212.
李东升, 隋青美, 贾 磊. 基于码分复用和波分复用的光纤布拉格光栅传感网络仿真研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(s1): s100212.
- 4 Pei Li, Ning Tigang, Qi Chunhui, *et al.*. Research on PMD compensation of CFBG in high speed optical communication system [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 142–146.
裴 丽, 宁提纲, 祁春慧, 等. 高速光通信系统光纤光栅色散补偿的偏振模色散研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 142–146.
- 5 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui, *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(2): 232–235.
黄 锐, 蔡海文, 瞿荣辉, 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, 32(2): 232–235.
- 6 JT Kringlebotn, PR Morkel, L Reekie, *et al.*. Efficient diode-pumped single-frequency erbium; ytterbium fiber laser [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, 5(10): 1162–1164.
- 7 C R Giles. Lightwave applications of fiber Bragg gratings [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1391–1404.
- 8 Jiacheng Hu, Fuchang Chen, Chengtao Zhang, *et al.*. Application of high-precision temperature-controlled FBG filter and light source self-calibration technique in the BOTDR sensor system [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(7): 072901.

- 9 Liu Xiaosong. The Research of Some Fiber-Optic Voltage Sensor Practical Problem [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. 31–35.
刘小松. 光纤电压传感器实用化的若干问题研究[D]. 北京交通大学, 2012. 31–35.
- 10 Zhu Hongtao, Zeng Yongfu, Dai Fengyu. Realization of MAX1978 in automatic temperature control of butterfly laser [J]. Optical Communication Technology, 2011, (7): 11–13.
朱宏韬, 曾永福, 代丰羽. 用 MAX1978 实现蝶形激光器的自动温度控制[J]. 光通信技术, 2011, (7): 11–13.
- 11 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, *et al.*. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405005.
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405005.
- 12 Wang Muguang, Li Tangjun, Zhuo Feng, *et al.*. Research of fiber grating sensor for simultaneous measuring strain and temperature [J]. J Transducer Technology, 2001, 20(9): 10–15.
王目光, 李唐军, 卓锋, 等. 应变和温度同时测量光纤光栅传感器的研究[J]. 传感器技术, 2001, 20(9): 10–15.
- 13 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing, *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(1): 83–86.
詹亚歌, 蔡海文, 向世清, 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 83–86.