

# $\pi$ 相移光纤光栅的温度调谐特性

孙俊杰<sup>1,2,3</sup>, 王泽锋<sup>1,2,3\*</sup>, 王 蒙<sup>1,2,3</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 根据  $\pi$  相移光纤光栅的温度可调谐原理, 使用半导体制冷器 (TEC) 和制冷片控制  $\pi$  相移光纤光栅的温度, 从而改变其中心波长。随着温度升高,  $\pi$  相移光纤光栅的中心波长向长波方向线性漂移, 温度从 0 °C 变化到 95 °C 时, 中心波长从 1548.921 nm 变化到 1550.664 nm, 波长改变量为 1.743 nm, 灵敏度约为 18.35 pm/°C。为了验证  $\pi$  相移光纤光栅温度调谐的特性, 采用与其匹配的高反光栅构成了 C 波段环形腔光纤激光振荡器, 利用  $\pi$  相移光栅的窄带滤波特性实现了窄线宽激光输出, 并通过控制  $\pi$  相移光栅的温度实现了输出激光波长的连续调谐。

**关键词** 光栅; 温度调谐;  $\pi$  相移光纤光栅; 窄线宽激光器; 可调谐激光

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1006004

## Temperature Tuning Properties of $\pi$ Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings

Sun Junjie<sup>1,2,3</sup>, Wang Zefeng<sup>1,2,3</sup>, Wang Meng<sup>1,2,3</sup>, Xi Xiaoming<sup>1,2,3</sup>, Chen Jinbao<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Based on the temperature tunable principle of  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg gratings, a thermo-electric cooler and a refrigeration wafer are used to control the temperature of a  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg grating, and then change its central wavelength. Its central wavelength has a bathochromic shift with temperature rising. As the temperature rises from 0 °C to 95 °C, the central wavelength changes from 1548.921 nm to 1550.664 nm with a total change of 1.743 nm. The sensitivity is approximately 18.35 pm/°C. In order to verify the temperature tuning properties of  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg gratings, we design a C-band ring-cavity fiber laser by using high reflectivity fiber Bragg grating (FBG) with matched reflectance spectrum. We use narrow-band filtering characteristics of  $\pi$  phase-shifted FBG to realize narrow linewidth fiber laser output, and control the temperature to realize continuous tuning of output laser wavelength.

**Key words** gratings; temperature tuning;  $\pi$  phase-shifted fiber grating; narrow linewidth lasers; tunable laser

**OCIS codes** 050.2770; 050.5080; 060.3735; 060.4080; 140.3510; 140.3600

## 1 引 言

$\pi$  相移光纤光栅 (FBG) 是指纤芯的折射率变化在某些位置存在大小为  $\pi$  的相位突变, 从而改变光谱的分布, 形成极窄的透射窗口, 广泛应用于分布式反馈激光器<sup>[1]</sup>、窄带滤波器<sup>[2]</sup>、全光开关<sup>[3]</sup> 和高精度传感<sup>[4-6]</sup> 等领域。通过刻写过程中的热处理法或控制光栅的温度、应力等, 可实现  $\pi$  相移光纤光栅的波长调谐, 在应

收稿日期: 2017-04-13; 收到修改稿日期: 2017-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(11274385)

作者简介: 孙俊杰(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤器件应用方面的研究。E-mail: 15143115236@163.com

导师简介: 陈金宝(1970—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: kdchenjinbao@aliyun.com

\* 通信联系人。E-mail: hotrosemaths@163.com

用中具有重要意义。其中,热处理法是指均匀光栅刻写完成后,对光栅的局部进行加热从而引进相移,相移的大小决定了透射窗口的位置,停止加热则相移消失,因此可以通过控制相移大小实现相移光纤光栅的调谐<sup>[7]</sup>。还可以通过压电转换器<sup>[8]</sup>、局部加压<sup>[9]</sup>等方式使光纤轴向发生形变,进而改变光纤光栅的局部折射率分布,引入非永久性相移,控制形变量即可实现相移光纤光栅的调谐<sup>[10]</sup>。此外, Liao 等<sup>[11]</sup>提出结合飞秒激光器和熔接技术制作可调谐相移光纤光栅,通过向光栅中的球形孔充入不同折射率的液体,从而在此处引入相移,即可实现相移光栅的调谐。纤芯温度的改变会导致光纤光栅的有效折射率和周期发生变化<sup>[12-13]</sup>,因此可以通过改变  $\pi$  相移光纤光栅的温度,使光栅传输谱及中心波长发生漂移,从而实现  $\pi$  相移光纤光栅的波长调谐,该方法具有成本低、易操作、无损伤等优点。结合  $\pi$  相移光纤光栅的窄带滤波特性,可以实现可调谐的窄线宽光纤激光器。

本文理论分析了  $\pi$  相移光纤光栅的温度调谐特性,利用半导体制冷器(TEC)和制冷片控制  $\pi$  相移光纤光栅的温度,实验验证了其温度调谐特性,并将其应用于窄线宽光纤激光器,实现了窄线宽激光器的可调谐输出。

## 2 理论分析与仿真

$\pi$  相移光纤光栅中纤芯的折射率变化沿轴向不连续,且存在一个大小为  $\pi$  的相位突变,导致光栅传输谱存在一个极窄的透射窗口,如图 1 所示。 $\pi$  相移光纤光栅长度为  $2L + \Delta l$ ,其中,  $\Delta l$  为光栅周期  $\Lambda_g$  的一半的奇数倍。

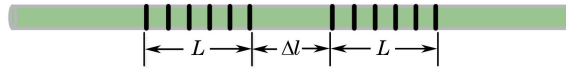


图 1  $\pi$  相移光纤光栅示意图

Fig. 1 Schematic of a  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg grating

$\pi$  相移光纤光栅的布拉格波长对应透射窗口的中心波长为

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda_g, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率。

当光栅温度改变时,由于热光效应和热膨胀效应,光纤的折射率和光栅周期会发生变化,进而改变光栅的布拉格波长和传输谱。由于光纤的热光系数  $\alpha$  和热膨胀系数  $\beta$  沿轴向不变,且在测量的温度范围内为常数,所以光栅不同位置的折射率和周期改变量相同,因此,变化后相移点的长度仍为半周期的奇数倍, $\pi$  相移光纤光栅的传输谱形保持不变,整体向短波或长波方向移动。

设  $n_0, \Lambda_0$  分别为温度为  $T_0$  时的折射率和光栅周期,则任一温度  $T$  时的折射率和光栅周期为

$$n = n_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (2)$$

$$\Lambda = \Lambda_0[1 + \beta(T - T_0)]. \quad (3)$$

光栅布拉格波长为

$$\lambda'_{\text{Bragg}} = 2n_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)] \cdot \Lambda_0 \cdot [1 + \beta(T - T_0)]. \quad (4)$$

石英光纤的热光系数  $\alpha \approx +1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ,热膨胀系数  $\beta \approx +5.2 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ <sup>[14]</sup>。由于  $\alpha$  和  $\beta$  均远小于 1,取一阶近似(4)式可以简化为

$$\lambda'_{\text{Bragg}} \approx \lambda_0[1 + \gamma(T - T_0)], \quad (5)$$

式中  $\lambda_0 = 2n_0\Lambda_0$  是温度为  $T_0$  时的布拉格中心波长,  $\gamma = \alpha + \beta$  是包含热光效应与热膨胀效应的温度系数,因此温度为  $T$  时波长变化量为

$$\Delta\lambda \approx \lambda_0\gamma(T - T_0), \quad (6)$$

可见,光栅布拉格波长即  $\pi$  相移光栅透射窗口的中心波长漂移与温度变化呈线性关系。

结合理论分析,利用传输矩阵理论进行了  $\pi$  相移光纤光栅的仿真,探究随温度改变折射率和周期变化后光栅的透射谱。仿真光纤为 SMF-28 光纤,常温下,纤芯半径为  $4 \mu\text{m}$ ,折射率为 1.45205,包层半径为  $62.5 \mu\text{m}$ ,折射率为 1.44681,基模的有效折射率为 1.44899。设置光栅长度为  $50 \text{ mm}$ ,光栅周期为  $\Lambda =$

534.614 nm, 对应光栅布拉格波长为 1549.3 nm。取光纤的热光系数为  $1.1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ , 热膨胀系数为  $5.2 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 。对温度为 5, 35, 65, 95  $^{\circ}\text{C}$  的情况进行仿真,  $\pi$  相移光栅透射谱如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 光栅波长改变量与温度改变量成正比, 与理论相符。

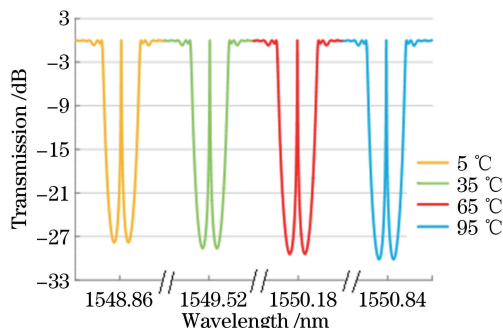


图 2 温度分别为 5, 35, 65, 95  $^{\circ}\text{C}$  时  $\pi$  相移光纤光栅仿真结果

Fig. 2 Simulation of  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg grating at temperatures of 5, 35, 65, 95  $^{\circ}\text{C}$

### 3 实验及结果

#### 3.1 $\pi$ 相移光纤光栅的温度调谐特性

$\pi$  相移光纤光栅温度调谐及测试实验装置如图 3 所示, 将  $\pi$  相移光纤光栅放置在与制冷片贴合的铝板上, 用导热胶进行固定与导热, 制冷片与 TEC 相连, 控制器通过调控 TEC 来改变制冷片的温度, 从而改变光栅的温度。测试系统中采用放大自发辐射 (ASE) 光源, 中心波长为 1565 nm, 光谱宽度为 74 nm, 与  $\pi$  相移光纤光栅的一端相连, 光栅的另一端连接光谱仪 (OSA, 日本横河, AQ6317) 测试透射谱。

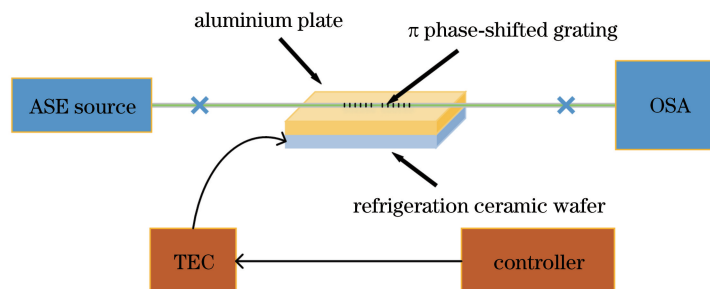


图 3  $\pi$  相移光纤光栅温度调谐及测试实验装置

Fig. 3 Experimental setup of temperature tuning and test of  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg grating

实验中, 以 5  $^{\circ}\text{C}$  为步长, 控制  $\pi$  相移光纤光栅的温度从 0  $^{\circ}\text{C}$  变化到 95  $^{\circ}\text{C}$ , 选取温度分别为 5, 35, 65, 95  $^{\circ}\text{C}$  时  $\pi$  相移光纤光栅的透射谱, 如图 4 所示, 随温度升高,  $\pi$  相移光纤光栅的透射谱带宽及深度保持不变。中心波长随温度的变化如图 5 所示, 从图中可以看出, 随着光栅温度的升高, 中心波长向长波方向呈线性移动, 从 1548.921 nm 移动到 1550.664 nm, 单位温度下移动范围为 18.35 pm, 同理论与仿真结果相吻合。

#### 3.2 $\pi$ 相移光纤光栅实现可调谐窄线宽激光器

基于  $\pi$  相移光纤光栅, 搭建了窄线宽环形腔光纤激光器实验系统, 如图 6 所示。系统由掺铒光纤放大器 (EDFA)、耦合器、环形器、 $\pi$  相移光纤光栅和与之相匹配的高反 (HR) 光纤光栅构成。其中, EDFA 使用 980 nm 半导体激光器 (LD) 作为抽运源, EDFA 输出的激光进入耦合器, 耦合器输出的一端作为激光器输出, 连接光谱仪监测其输出光谱, 另一端作为环形腔反馈, 与环形器 1 口相连, 进入 2 口的光被高反光栅反射, 位于高反光栅反射带内的光经环形器 3 口输出通过  $\pi$  相移光纤光栅, 利用  $\pi$  相移光纤光栅极窄的透射窗口作为窄带滤波器, 获得窄线宽激光输出。当高反光栅的反射带宽小于  $\pi$  相移光纤光栅的透射带宽且覆盖  $\pi$  相移光纤光栅的透射窗口时, 输出激光的中心波长即为  $\pi$  相移光纤光栅透射窗口的中心波长。

使用图 3 中的温度调谐装置控制  $\pi$  相移光纤光栅的温度进而改变其中心波长, 使用同样的装置控制高

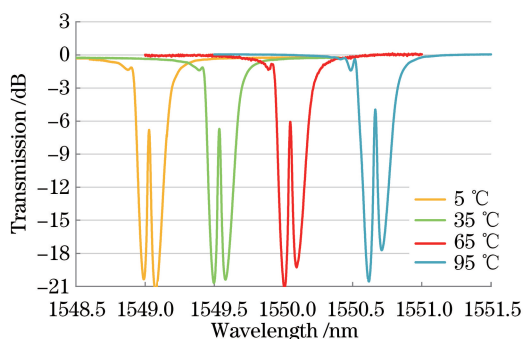


图 4 温度分别为 5, 35, 65, 95 °C 时  $\pi$  相移光纤光栅透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg grating at temperatures of 5, 35, 65, 95 °C

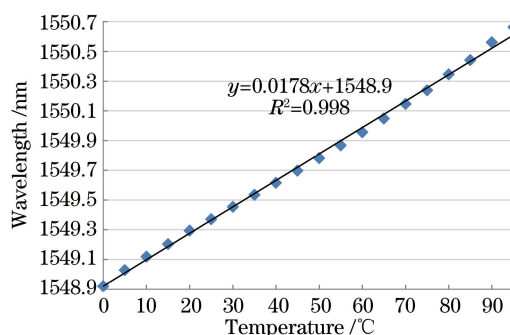


图 5  $\pi$  相移光纤光栅中心波长随温度变化曲线

Fig. 5 Central wavelength changing curve of  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg grating with temperature

反光栅的温度使其与  $\pi$  相移光纤光栅相匹配, 在不同温度下获得了不同波长的激光输出, 实现了窄线宽光纤激光器的可调谐。控制  $\pi$  相移光纤光栅的温度从 5 °C 变化到 95 °C, 得到的不同温度下的激光器输出光谱如图 7 所示, 可见, 输出激光中心波长随  $\pi$  相移光纤光栅温度呈线性变化, 与  $\pi$  相移光纤光栅的温度调谐特性相吻合。

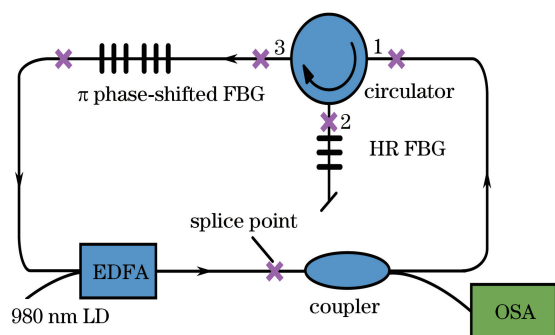


图 6 基于  $\pi$  相移光纤光栅的窄线宽光纤激光器实验装置

Fig. 6 Experimental setup of narrow linewidth fiber laser based on  $\pi$  phase FBG-shifted fiber Bragg grating

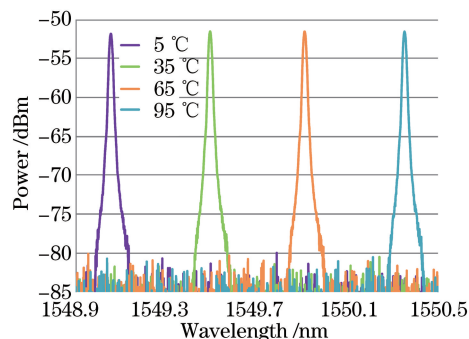


图 7 不同  $\pi$  相移光纤光栅温度下的激光器输出光谱

Fig. 7 Output spectra of laser at different temperatures of  $\pi$  phase-shifted fiber Bragg grating

## 4 结 论

理论和实验研究了  $\pi$  相移光纤光栅的温度调谐特性, 利用 TEC 和制冷片控制温度, 实现了 1.55  $\mu\text{m}$  波段  $\pi$  相移光纤光栅的温度调谐。当温度从 0 °C 变化到 95 °C 时, 中心波长改变了 1.743 nm, 灵敏度约为 18.35 pm/°C。相比其他波长调谐方式, 温度调谐具有成本低、易操作、无损伤等特点。结合  $\pi$  相移光纤光栅的窄带滤波特性, 搭建了窄线宽环形腔光纤激光器, 利用  $\pi$  相移光纤光栅的温度调谐特性实现了 1.55  $\mu\text{m}$  波段窄线宽激光波长的连续调谐输出, 为实现可调谐窄线宽光纤激光器提供了一条简单可行的技术途径。

**致谢** 感谢加拿大瑞尔森大学的顾锡嘉教授在光纤光栅刻写方面的指导。

## 参 考 文 献

- [1] Kurkov A S, Bernage P, Niay P, *et al.* 1.55  $\mu\text{m}$  single-frequency long-cavity fiber laser with  $\pi/2$  phase shifted DFB mode selection[C]. IEE Colloguium on Optical Fiber Gratings, 1997: 5559560.
- [2] Zhao Y, Chang J, Wang Q, *et al.* Research on a novel composite structure  $\text{Er}^{3+}$ -doped DBR fiber laser with a  $\pi$ -phase shifted FBG[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22515-22522.
- [3] Melloni A, Chinello M, Martinelli M. All-optical switching in phase-shifted fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(1): 42-44.
- [4] Guo J, Yang C. Highly stabilized phase-shifted fiber Bragg grating sensing system for ultrasonic detection[J]. IEEE

- Photonics Technology Letters, 2015, 27(8): 848-851.
- [5] Malara P, Campanella C E, de Leonardi F, *et al.* Enhanced spectral response of  $\pi$ -phase shifted fiber Bragg gratings in closed-loop configuration[J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 2124-2126.
- [6] Huang W, Zhang W, Zhen T, *et al.*  $\pi$ -phase-shifted FBG for high-resolution static-strain measurement based on wavelet threshold denoising algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(22): 3692-3698.
- [7] Ahuja A K, Steinvurzel P E, Eggleton B J, *et al.* Tunable single phase-shifted and superstructure gratings using microfabricated on-fiber thin film heaters[J]. Optics Communications, 2000, 184(1/2/3/4): 119-125.
- [8] Xu M G, Alavie A T, Maaskant R, *et al.* Tunable fibre bandpass filter based on a linearly chirped fibre Bragg grating for wavelength demultiplexing[J]. Electronics Letters, 1996, 32(20): 1918-1919.
- [9] Hamarsheh M M N, Falah A A S, Mokhtar M R. Tunable fiber Bragg grating phase shift by simple pressure packaging [J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 016105.
- [10] Wu L, Pei L, Liu C, *et al.* Research on tunable phase shift induced by piezoelectric transducer in linearly chirped fiber Bragg grating with the  $V$ - $I$  transmission matrix formalism[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 79: 15-19.
- [11] Liao C, Xu L, Wang C, *et al.* Tunable phase-shifted fiber Bragg grating based on femtosecond laser fabricated in-grating bubble[J]. Optics Letters, 2013, 38(21): 4473-4476.
- [12] Wang Yiping, Tang Jian, Yin Guolu, *et al.* The fabrication method and sensing application of fiber grating[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 809-819.  
王义平, 唐 剑, 尹国路, 等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 809-819.
- [13] Zhang Xin, Yang Zhi, Li Qianglong, *et al.* Research on temperature tuning properties of chirped fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0505002.  
张 新, 杨 直, 李强龙, 等. 啁啾光栅的温度调谐特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505002.
- [14] Kashyap R. Fiber Bragg gratings[M]. New York: Academic Press, 1999: 83.