

基于光栅局域温度控制的高精度多相移的产生和滤波器的制备

梁虹^{1,2}, 应康^{1*}, 王迪³, 魏金金³, 李璇¹, 皮浩洋¹, 魏芳¹, 蔡海文^{1,2**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100

摘要 提出了一种利用局域温度控制的高精度相移控制技术制备多相移光纤光栅滤波器的方法。首先, 分析了多相移光纤光栅中相移量和相移位置的误差对多相移光纤光栅滤波器的插入损耗、带宽和形状因子的影响, 得到了高性能多相移光纤光栅制备所需的相移量精度(0.0029 π)和相移位置精度(368 μm)。然后, 实验证实了利用局域温度控制引入高精度相移(相移量精度为 0.0007 π , 相移位置精度为 30 μm)的可行性。最后, 利用所提方法制备了多相移光纤光栅, 并对其光谱进行了测试和理论仿真。结果表明, 基于所提方法制备的多相移光纤光栅滤波器的频率响应接近理论仿真下的理想滤波器特性, 插入损耗约为 0.5 dB, 3 dB 带宽约为 366 MHz, 20 dB 带宽约为 972 MHz, 形状因子约为 0.38。所提制备多相移光纤光栅滤波器的方法精确、简单、经济, 没有对光纤光栅的结构造成永久性的改变, 具有相移量可擦除的优势, 可进一步应用于制备新型可调谐光纤滤波器。

关键词 光纤光学; 光纤器件; 多相移光纤布拉格光栅; 局域温度控制; 光学滤波器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1606001

1 引言

超窄带通光学滤波器为微波光子学、密集波分复用、相干通信和光纤传感等领域信号处理的关键器件^[1-5]。理想的超窄带通光学滤波器具有由超平坦的通带和非常陡峭的边缘组成的矩形频率响应。平坦的通带可以使信号不发生畸变, 具有高的信号保真度; 陡峭的边缘可以抑制相邻波段的串扰^[6]。光纤布拉格光栅(FBG)由于具有体积小、抗电磁干扰、插入损耗小、与其他光纤器件和系统完全兼容的固有优点, 被广泛应用于实现各种不同频率响应的带通光学滤波器。但是, 普通的均匀 FBG 带宽比较大, 一般在十几 GHz 甚至百 GHz。虽然相移光纤布拉格光栅(PSFBG)可以获得 100 MHz 以下的带宽, 但是洛伦兹线型或者准洛伦兹线型的频率响应限制了其在高分辨率信号处理中的应用。近年来, 含有多个相移点的多相移光纤布拉格光栅

(MPSFBG)被用来设计超窄带通光学滤波器, 通过优化设计各个相移量为 π 的相移点的位置, 可以获得插入损耗较小、矩形度较高的窄带平顶滤波响应^[7-10]。而在实际制备时, 相移量和相移位置的控制会存在误差, 将直接导致实际光谱和理想情况下理论计算得到的光谱存在差异。因此高精度相移的引入方案是制备 MPSFBG 的关键。

在过去几十年中, 科研工作者提出了大量不同的在 FBG 中引入相移的方法。最常用的方法是相移相位掩模板法^[11], 这种方法效率高, 重复性好。但是相移相位掩模板的波长、相移量和相移位置固定, 只能制作单一波长和相移的 PSFBG, 写制不灵活, 价格相对昂贵。紫外曝光后处理法^[12]可减小对写制掩模板的要求, 但需要通过准确控制激光光斑大小和曝光时间来制造所期望的相移, 王迪等^[8]采用这种方法实现了相移量精度约为 0.01 π 的

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-12; 录用日期: 2021-01-20

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB0408300, 2020YFB0408301)、国家自然科学基金(61535014, 61805260)、上海市自然科学基金(18ZR1444300)、科工局稳定支持基金(HTKJ2020KL504004)、钱学森青年创新基金

通信作者: *yingk0917@siom.ac.cn; **E-mail: hwcai@siom.ac.cn

MPSFBG。然而,这些技术刻写的相移是静态不可擦除的。因此,对于 MPSFBG 这种结构复杂的光栅,这些方法刻写成品率很低。为了解决这一问题,通常采用对 FBG 进行无损改变引入相移的方法制备 MPSFBG,比如机械拉伸法或者加温法。常见的利用机械拉伸法实现相移的方案有采用压电陶瓷(PZT)^[13-14]和采用局域微应变结构^[15-16]。但是 PZT 的工作电压为 150~180 V,比较高,因此需要额外的功率放大器来驱动 PZT,另外微型 PZT 价格昂贵而且对 FBG 的粘贴技术要求较高;对于局域微应变结构,需要设计复杂的结构。现阶段采用加温技术实现相移的方法通常是利用电阻丝^[17-18],但是电阻丝不能制冷,造成了在温度控制过程中的加热和冷却速率的不对称,所以采用电阻丝进行温度控制时引入相移的精度比较低。因此,探索一种简单、经济、高效的制备 MPSFBG 的方法是至关重要的。

本文提出了一种利用热电冷却器(TEC)进行局域温度控制动态改变 FBG 相移的方法,该方法能够在 FBG 中高精度地引入可控的、稳定的相移。由于热胀效应和热光效应,FBG 局部的折射率和调制周期会随着温度的变化而改变,这样在 FBG 中就会引入相移。通过对理论仿真和实验结果的分析可以得到,所提对 FBG 进行无损改变形成可擦除相移的方法所达到的相移精度(相移量精度为 0.0007π ,相移位置精度为 $30\ \mu\text{m}$)满足理论分析过程中 MPSFBG 获得插入损耗较小、矩形度较高的窄带平顶滤波响应所需要的相移精度(相移量精度为 0.0029π ,相移位置精度为 $368\ \mu\text{m}$)要求。利用所提方法制备了双相移光纤光栅,获得了与理论仿真结果一致的频率响应特性,插入损耗约为 $0.5\ \text{dB}$, $3\ \text{dB}$ 带宽约为 $366\ \text{MHz}$, $20\ \text{dB}$ 带宽约为 $972\ \text{MHz}$,形状因子约为 0.38 。

2 理论分析

图 1 为 MPSFBG 的结构示意图, n 个相移点将 MPSFBG 分成 $n+1$ 段子 FBG,其中 L_i 和 θ_i 分别表示第 i 段子 FBG 的长度和第 i 个相移点的相移量。根据传输矩阵法,该 MPSFBG 的频率响应可以表示为

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -r_{n+1}^* \\ t_{n+1}^* & t_{n+1}^* \\ -r_{n+1} & 1 \\ t_{n+1} & t_{n+1} \end{bmatrix}}_{L_{n+1}} \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-j\theta_n} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_n} \end{bmatrix}}_{\theta_n} \dots$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -r_{i+1}^* \\ t_{i+1}^* & t_{i+1}^* \\ -r_{i+1} & 1 \\ t_{i+1} & t_{i+1} \end{bmatrix}}_{L_{i+1}} \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-j\theta_i} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_i} \end{bmatrix}}_{\theta_i} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -r_i^* \\ t_i^* & t_i^* \\ -r_i & 1 \\ t_i & t_i \end{bmatrix}}_{L_i} \dots$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} e^{-j\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_1} \end{bmatrix}}_{\theta_1} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -r_1^* \\ t_1^* & t_1^* \\ -r_1 & 1 \\ t_1 & t_1 \end{bmatrix}}_{L_1} \begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$r_i = -j \frac{\kappa_i \sinh(\gamma_i L_i)}{\gamma_i \cosh(\gamma_i L_i) + j\Delta\beta_i \sinh(\gamma_i L_i)}, \quad (2)$$

$$t_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_i \cosh(\gamma_i L_i) + j\Delta\beta_i \sinh(\gamma_i L_i)}, \quad (3)$$

式中: r 和 t 分别表示 MPSFBG 的反射系数和透射系数; r_i 、 t_i 、 $\Delta\beta_i$ 和 κ_i 分别表示第 i 段子 FBG 的反射系数、透射系数、失谐量和耦合系数; $\gamma_i^2 = \kappa_i^2 - \Delta\beta_i^2$ 。以 $30\ \text{mm}$ 长的 MPSFBG 为例,利用传输矩阵法,对其透射谱($T = 10\lg |t|^2$)进行数值仿真。根据已有的研究结果,对于 $\theta_i = \pi$ 的 MPSFBG,可以通过优化相移点的位置,在透射谱的阻带中得到一个矩形度较高的窄带平顶透射峰^[7-10]。图 2(a)各曲线分别表示具有 1,2,3,4,5 个相移点的 MPSFBG 的透射谱。为了表征透射峰的矩形度,定义 $3\ \text{dB}$ 和 $20\ \text{dB}$ 带宽的比值为形状因子 s , s 越接近于 1 表示透射峰的矩形度越好。图 2(b)为 MPSFBG 透射峰的形状因子随相移点数目的变化,可以看出,随着相移点数的增加,透射峰的形状因子增大,即透射峰的矩形度越好。

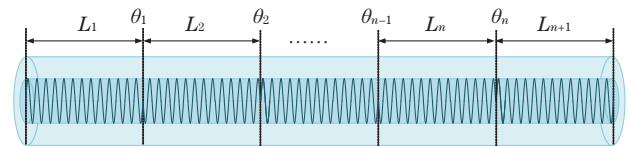


图 1 MPSFBG 的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the MPSFBG structure

然而,在实际制备 MPSFBG 的过程中会存在一些工艺误差,如相移量和相移位置的误差。根据已有的研究结果,这些误差的引入会影响 MPSFBG 的滤波特性,并且在长度较短的 MPSFBG 中,这些误差的影响将会更加显著^[8]。仍以 $30\ \text{mm}$ 长的双相移光纤光栅为例,分析相移量和相移位置的误差对滤波器的插入损耗、带宽和形状因子的影响。将双相移光纤光栅中两个相移点的相移量误差分别表示为 $\Delta\theta_1 = 0.5\pi - \theta_1$ 、 $\Delta\theta_2 = 0.5\pi - \theta_2$ 。在实际制备过程中,引入的相移量误差可分为两种:1)仅一个相移

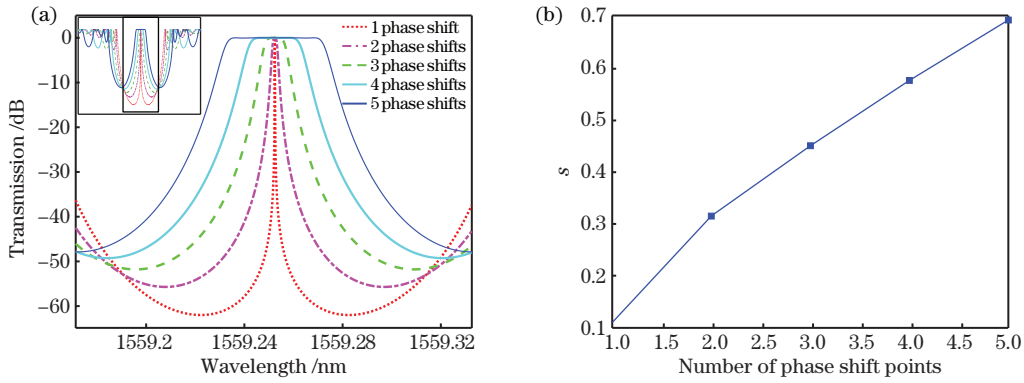


图 2 MPSFBG 的光谱响应。(a)MPSFBG 透射谱中透射峰的局部放大图,插图为 MPSFBG 的整个透射谱;
(b)MPSFBG 透射峰的形状因子随相移点数目变化趋势

Fig. 2 Spectrum of the MPSFBG. (a) Partial enlarged view of the transmission peak in the MPSFBG transmission spectrum, and the inset is the entire transmission spectrum of the MPSFBG; (b) shape factor of the MPSFBG transmission peak changing with number of phase shift points

点的相移量存在误差, $\Delta\theta_1 \neq 0, \Delta\theta_2 = 0$; 2) 两个相移点的相移量都存在误差, $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 \neq 0$ 。图 3 分析了一个相移点的相移量误差对双相移光纤光栅滤波器损耗、带宽和形状因子的影响。随着 $\Delta\theta_1$ 的增大,透射峰由一个平顶透射峰分离成两个透射峰,并且带宽和损耗也随之增大;另外,滤波器的形状因子

也随着 $\Delta\theta_1$ 的增大而增大,即透射峰的矩形度随着 $\Delta\theta_1$ 的增大而变好。这就说明随着 $\Delta\theta_1$ 的增大,3 dB 带宽比 20 dB 带宽劣化得更快。图 4 分析了两个相移点的相移量都存在误差时,双相移光纤光栅滤波器参数的变化。从图 4 可以看出,随着 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 的增大,透射峰的带宽、损耗和形状因子都

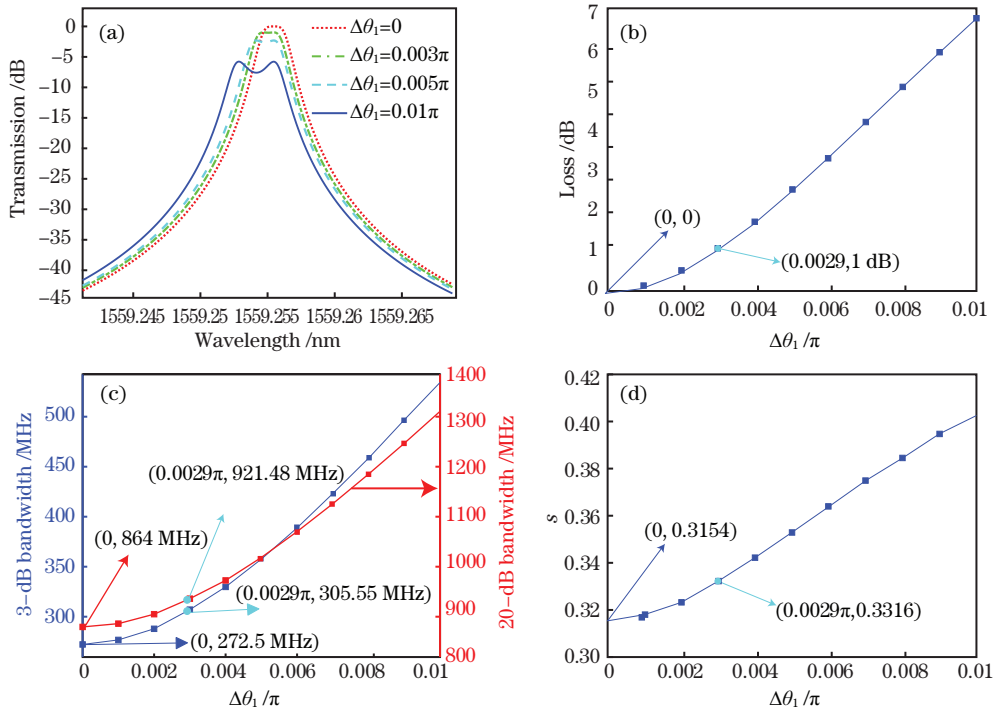


图 3 双相移光纤光栅中的一个相移点的相移量误差对滤波器参数的影响。(a)不同单相移量误差下的光纤光栅透射谱;
(b)不同单相移量误差下的光纤光栅损耗;(c)不同单相移量误差下的光纤光栅带宽;(d)不同单相移量误差下的
光纤光栅形状因子

Fig. 3 Influence of the phase shift amount error of one phase shift point in the dual-phase-shifted FBG on the filter parameters. (a) Transmission spectra of fiber grating at different one phase shift amount errors; (b) loss of fiber grating at different one phase shift amount errors; (c) bandwidth of fiber grating at different one phase shift amount errors; (d) shape factor of fiber grating at different one phase shift amount errors

增大。值得注意的是,对比图 3 和图 4,可以看出当相移量存在误差时,仅一个相移点的相移量存在误差就对滤波器的参数影响比较大。为了保证信号质量,滤波器的插入损耗和形状因子的劣化都应该控

制在一定范围内。以插入损耗增加 1 dB、形状因子劣化 10% 为例。综合图 3 和图 4 可以得到,对于 3 dB 带宽为 272.5 MHz 的透射峰,相移量误差的容限约为 0.0029π 。

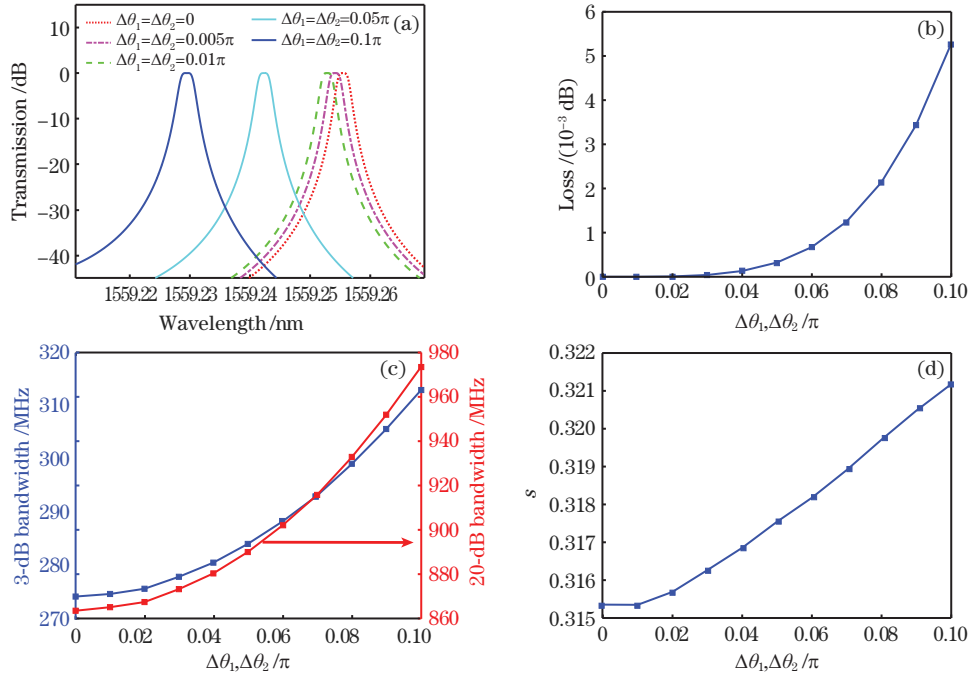


图 4 双相移光纤光栅中的两个相移点的相移量误差对滤波器参数的影响。(a)不同两个相移点相移量误差下的光纤光栅透射谱;(b)不同两个相移点相移量误差下的光纤光栅损耗;(c)不同两个相移点相移量误差下的光纤光栅带宽;(d)不同两个相移点相移量误差下的光纤光栅形状因子

Fig. 4 Influence of the phase shift amount error of the two phase shift points in the dual-phase-shifted FBG on the filter parameters. (a) Transmission spectra of fiber grating at different two phase shift amount errors; (b) loss of fiber grating at different two phase shift amount errors; (c) bandwidth of fiber grating at different two phase shift amount errors; (d) shape factor of fiber grating at different two phase shift amount errors

接下来分析相移点的位置误差对滤波器滤波特性的影响。对于 30 mm 长的双相移光纤光栅,要获得理想的窄带平顶滤波响应,三段子 FBG 的长度分别为 7.5, 15, 7.5 mm。双相移光纤光栅中两个相移点的位置误差可由 $\Delta Z_1 = L_1 - 7.5$ 、 $\Delta Z_2 = 7.5 - L_3$ 表示,相移点的位置误差也分为两种:1)仅一个相移点的位置存在误差, $\Delta Z_1 \neq 0$ 、 $\Delta Z_2 = 0$,造成一端的子 FBG 长度 L_1 和中间的子 FBG 长度 L_2 有误差;2)两个相移点的位置都存在误差, $\Delta Z_1 = \Delta Z_2 \neq 0$,造成中间的子 FBG 长度 L_2 保持不变,两端的子 FBG 长度 L_1 、 L_3 有误差。图 5 分析了一个相移点的位置误差对滤波器参数的影响。当 $\Delta Z_1 < 0$ 时,相移点的位置向左移动, L_1 减小, L_2 增加,此时透射峰的损耗逐渐增大,带宽和形状因子逐渐减小;当 $\Delta Z_1 > 0$ 时,相移点的位置向右移动, L_1 增加, L_2 减小,此时透射峰的损耗、带宽和形状因子都增大。随后分析两个相移点的位置都存在误差的情况对滤波

器参数的影响,这种情况下 $\Delta Z_1 = \Delta Z_2 < 0$ 和 $\Delta Z_1 = \Delta Z_2 > 0$ 对滤波器的影响是对称的。因此,以 $\Delta Z_1 = \Delta Z_2 > 0$ (两个相移点同时向右移动)为例,如图 6 所示,分析了两个相移点的位置误差对滤波器参数的影响,可以看到随着 ΔZ_1 和 ΔZ_2 的增大,透射峰的透过率不变,带宽和形状因子变小,且位置误差越大,带宽越小,矩形度越差。对比图 5 和图 6 可以看出,当相移点的位置存在误差时,仅一个相移点的位置有误差就对滤波器参数的影响比较大。与相移量误差容限的分析类似,以插入损耗增加 1 dB、形状因子劣化 10% 为限制,综合图 5 和图 6 可以得到,对于 3 dB 带宽为 272.5 MHz 的双相移光纤光栅滤波器,相移点的位置误差容限约为 368 μm 。

综上所述,对于 30 mm 长的双相移光纤光栅来说,为了获得插入损耗较小、矩形度较好的窄带平顶滤波响应,MPSFBG 中的相移需要满足相移量精度小于 0.0029π ,相移位置精度小于 368 μm 的条件。

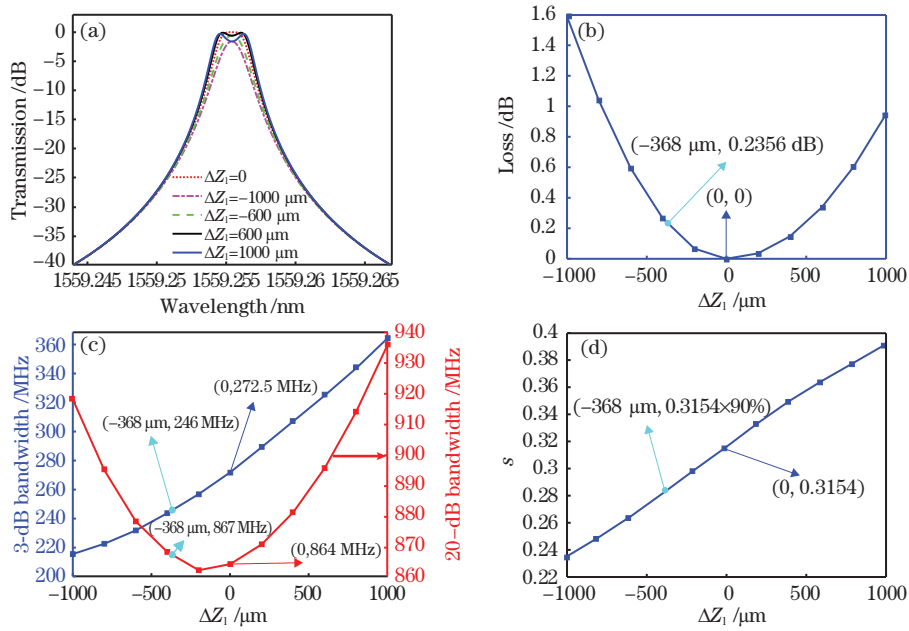


图 5 双相移光纤光栅中的一个相移点的位置误差对滤波器参数的影响。(a)不同单相移点位置误差下的光纤光栅透射谱;(b)不同单相移点位置误差下的光纤光栅损耗;(c)不同单相移点位置误差下的光纤光栅带宽;(d)不同单相移点位置误差下的光纤光栅形状因子

Fig. 5 Influence of the position error of one phase shift point in the dual-phase-shifted FBG on the filter parameters. (a) Transmission spectra of fiber grating at different one phase shift position errors; (b) loss of fiber grating at different one phase shift position errors; (c) bandwidth of fiber grating at different one phase shift position errors; (d) shape factor of fiber grating at different one phase shift position errors

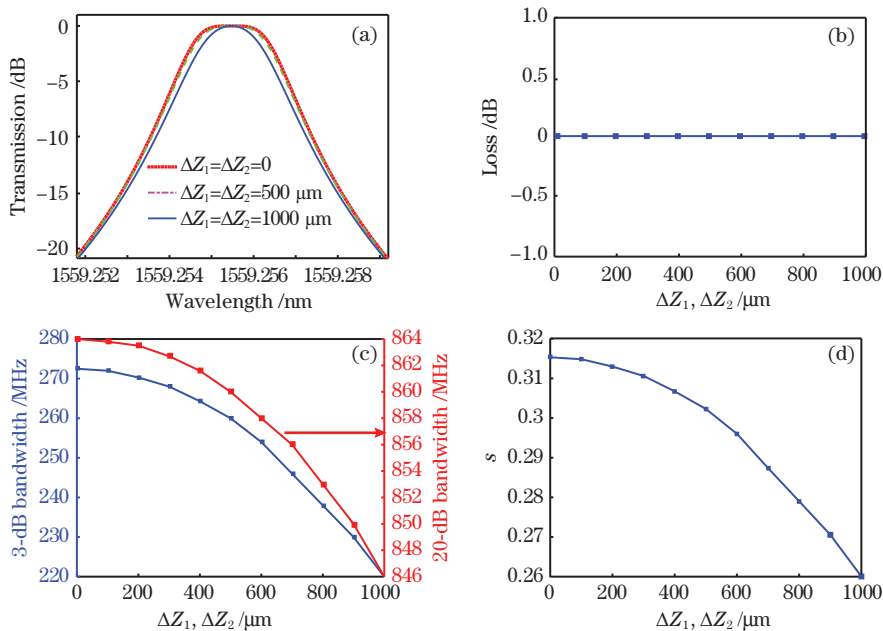


图 6 双相移光纤光栅中的两个相移点的位置误差对滤波器参数的影响。(a)不同双相移点位置误差下的光纤光栅透射谱;(b)不同双相移点位置误差下的光纤光栅损耗;(c)不同双相移点位置误差下的光纤光栅带宽;(d)不同双相移点位置误差下的光纤光栅形状因子

Fig. 6 Influence of the position errors of the two phase shift points in the dual-phase-shifted FBG on the filter parameters. (a) Transmission spectra of fiber grating at different two phase shift position errors; (b) loss of fiber grating at different two phase shift position errors; (c) bandwidth of fiber grating at different two phase shift position errors; (d) shape factor of fiber grating at different two phase shift position errors

3 实验结果

提出了一种基于局域温度控制对 FBG 进行无损改变进而引入高精度可控相移的方法,实现 MPSFBG 的制备,如图 7 所示。该方案的原理如图 7(b)所示,局域温度的变化会影响受热段 FBG 的周期和有效折射率,形成与原 FBG 结构不同的光栅,从而在加温区域获得了一个积累的相移。值得注意的是,所提方法不会对 FBG 的结构造成永久性的改变,当对 FBG 的加热停止时,局域温度控制所引入的相移便会消失, MPSFBG 恢复为原始的 FBG。实验中,采用如图 7(c)、(d)所示特殊设计的局域温度控制结构来对 FBG 进行加热,图中仅给出了一个这样的结构,要获得 MPSFBG,需要多个这样的结构对 FBG 的不同位置进行独立温控,引入多个相移。在该结构中,FBG 的局域温度控制是通过一个含有 1 mm 宽凸起的铜片实现的,FBG 被放置在这个铜片凸起的光纤槽中。该铜片凸起宽度的选取是综合考虑 FBG 受热长度对 MPSFBG 光谱的影响^[15]和金属铜的刚性对局域温度控制结构的要求的结果。通过 TEC 对铜片的基座进行加热,热敏电阻被固定在铜片的基座上。在实验中,当铜片受热时,放置在光纤槽中的一小段 1 mm 长的 FBG 由于受热形成

和未受热部分结构不同的光栅,从而得到相移。但是,暴露在空气中的铜片会和周围的空气交换热量,不仅会导致铜片的温度易受环境温度的影响,使温度控制不易实现,还会导致整段 FBG 周围的空气被加热,从而影响局域温度控制的效果。因此,为了确保大部分的热量都传递到铜片的凸起而不对 FBG 周围的空气加热,铜片被隔离在由聚酰亚胺制作的绝热壳中。该特殊设计的局域温度控制结构引入的相移可表示为

$$\theta = \frac{2\pi n_{\text{eff}} L_{\text{PS}}}{\lambda_{\text{B}}} (\alpha + \beta) \Delta T, \quad (4)$$

式中: λ_{B} 为 FBG 的波长; L_{PS} 和 ΔT 为受热段的长度和升温; n_{eff} 、 α 和 β 为光纤的有效折射率、热胀系数和热光系数,对于一般的单模石英光纤, $n_{\text{eff}} = 1.45$ 、 $\alpha = 5.6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 、 $\beta = 8.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。实验中所采用的温度控制模块(LDC-3724C, ILX Lightwave)精度可达到 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$,因此对于 1550 nm 波段的 FBG,该特殊设计的局域温度控制结构对相移量的控制精度理论上可达到 0.00017π 。实验中相移位置的移动是通过精密微调整架(M-561D, Newport)实现的,该调整架的精度为 $5 \text{ } \mu\text{m}$ 。将特殊设计的局域温度控制结构固定在精密微调整架

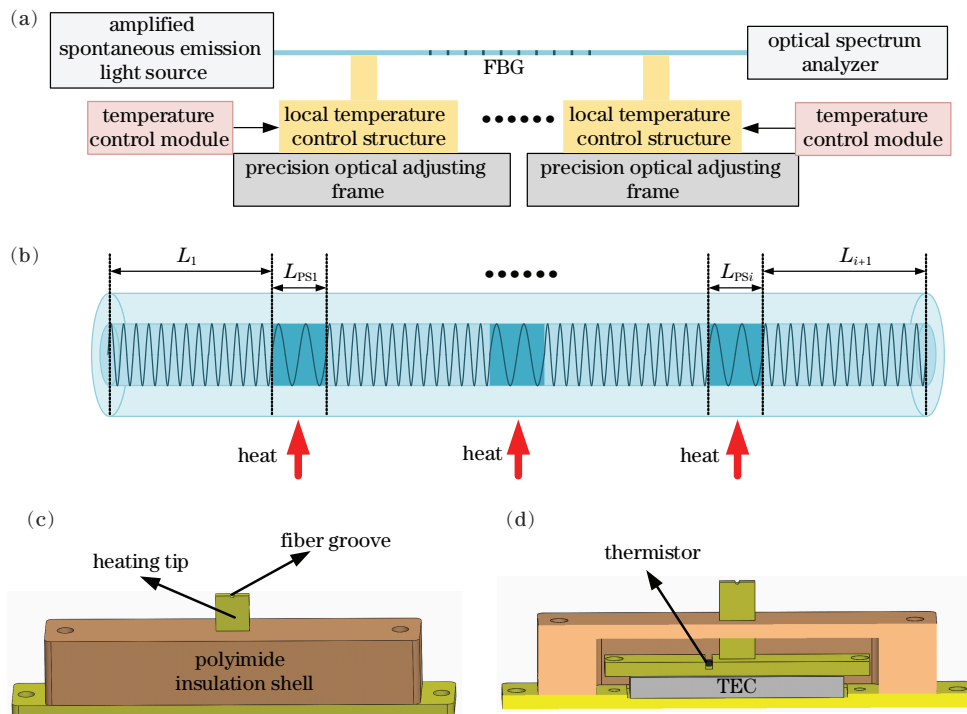


图 7 多相移光纤光栅实验结构装置图。(a)实验装置图;(b)FBG 利用局域温度控制引入多个相移的理论模型;

(c)局域温度控制结构;(d)局域温度控制结构的剖面图

Fig. 7 Structure and experimental setup of MPSFBG. (a) Schematic of the experimental setup; (b) theoretical model of FBG introducing multiple phase shifts using local temperature control; (c) local temperature control structure; (d) sectional view of the local temperature control structure

上,然后通过调整微调架来移动局域温度控制结构的位置。通过光谱确定所需要的相移的位置后,对 FBG 进行点胶封装。

为了更进一步确定设计的局域温度控制结构对相移量和相移位置的控制精度,首先在均匀 FBG 中引入单个相移,并通过实验测量引入过程中的相移量和相移位置的误差。采用扫描法^[19]刻写了一个长度为 30 mm 的均匀 FBG,实验过程中,采用分辨率为 0.04 pm 的高精度光谱仪(AP2041B, APEX)对相移的引入过程进行实时监测。图 8 为实验测得的未受到加温处理的均匀 FBG 的透射光谱和理论仿真图,实验测得的光谱图底部的平坦现象是光谱仪有限的测量范围导致的。由于在实际刻写 FBG 时会引入损耗^[20-21],并且 PSFBG 和光纤光栅法布里-珀罗腔存在损耗增强效应,FBG 反射率越高,谐振效应越明显,透射峰的损耗就越显著,因此在理论仿真过程中引入了损耗系数^[22]。

图 9 分析了实验中局域温度控制方案在均匀 FBG 中引入的相移量精度。由于相移量每 2π 为一个周期,根据(4)式可知,相移量随温度的变化是一个周期的过程,并且在一个相移周期内相移量和温度的变化呈线性关系。综合考虑 TEC 功耗的限制和相移量随温度变化的周期性,实验中选取了最

靠近环境温度的一个相移周期进行实验。图 9(a)为实验测得的在不同温度下均匀 FBG 的透射谱的演化过程。利用传输矩阵法对图 9(a)中的实验结果进行拟合,得到了不同温升所引入的实际相移量,如图 9(b)所示。对实验所得到的相移量进行线性拟合,得到如图 9(c)所示的实线,实验结果和线性拟合的差异如图 9(c)中的菱形点所示,这些菱形点都处于 $|E_{\text{phase}}| < 0.0007\pi$ 的区域内, E_{phase} 为相移量精度,可得到该方案所引入的相移量精度约为 0.0007π 。对在均匀 FBG 中引入的相移位置精度进

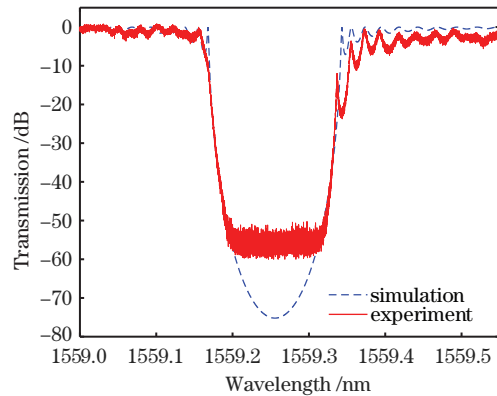


图 8 未受加温处理的均匀 FBG 的透射谱
Fig. 8 Transmission spectra of the uniform FBG without heating

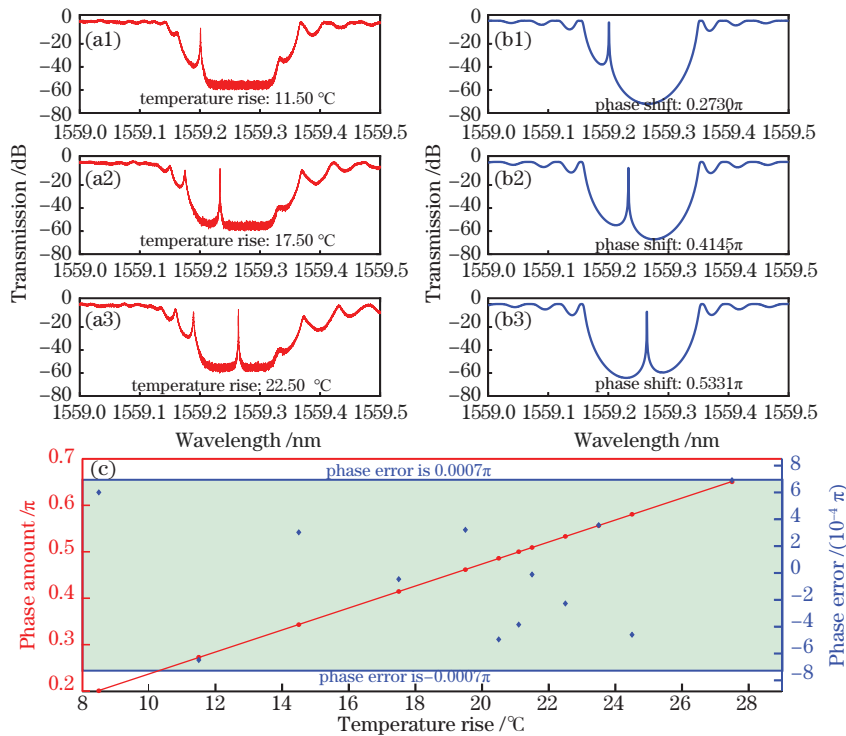


图 9 均匀 FBG 受到不同温度时的透射谱。(a)实验结果;(b)理论仿真结果;(c)实验结果和理论仿真结果的差异
Fig. 9 Transmission spectra of the uniform FBG at different temperatures. (a) Experimental results; (b) theoretical simulation results; (c) difference between the experimental results and theoretical simulation results

行了分析,结果如图 10 所示。在实验中,控制加热温度为 $21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变(对应的相移量为 0.5001π),移动加热的位置,均匀 FBG 透射谱的演化过程如图 10(a)所示,理论拟合结果如图 10(b)所示。图 10(c)中,横坐标为实验中局域温度控制结构所加热的位置,圆点为

理论拟合所得到的相移所处的位置,菱形点为实际加热的位置与理论拟合的位置的差异,所有的菱形点都处于 $|E_{\text{location}}| \leq 30\text{ }\mu\text{m}$ 的区域内, E_{location} 为相移位置精度,可得到利用 TEC 在均匀 FBG 中引入的相移位置精度约为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。

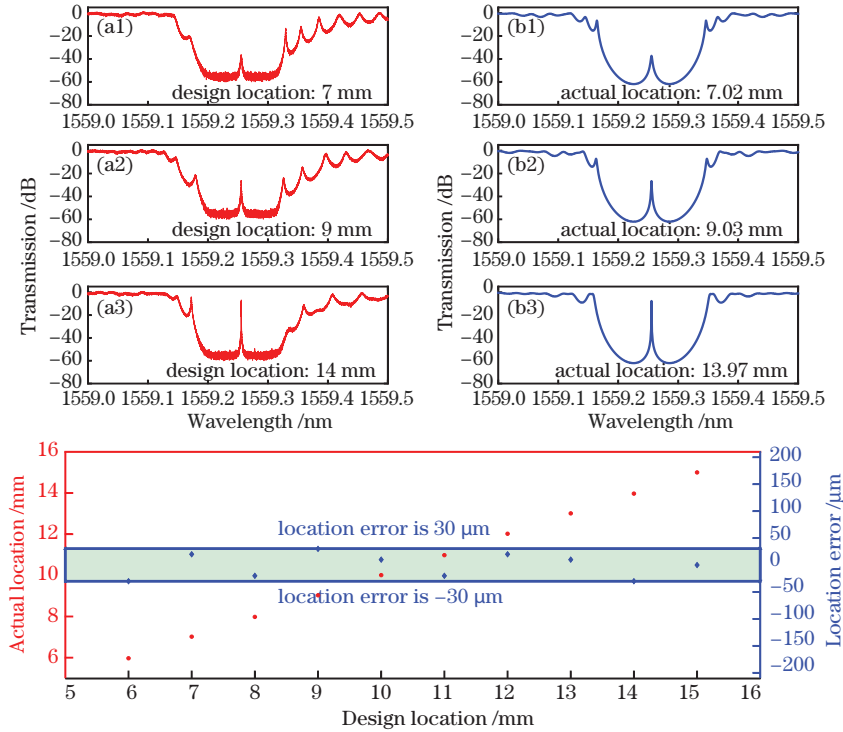


图 10 均匀 FBG 不同位置受到加热时的透射谱。(a)实验结果;(b)理论仿真结果;(c)实验结果和理论仿真结果的差异
Fig. 10 Transmission spectra when the uniform FBG is heated at different positions. (a) Experimental results; (b) theoretical simulation results; (c) difference between the experimental results and theoretical simulation results

根据上述实验结果可知,利用 TEC 进行局域温度控制引入相移的方法所得到的相移量精度 (0.0007π)和相移位置精度 ($30\text{ }\mu\text{m}$)可以满足窄带平顶滤波响应 MPSFBG 对于相移量精度 (0.0029π)和相移位置精度 ($368\text{ }\mu\text{m}$)的要求。图 11 中实线为实验所得到的双相移光纤光栅的透射峰,此时透射峰的插入损耗约为 0.5 dB , 3 dB 带宽约为 366 MHz , 20 dB 带宽约为 972 MHz ,形状因子约为 0.38 。图 11 中虚线为相移点处于理想情况下(相移量为 0.5π ,相移位置为 $7.5, 15, 7.5\text{ mm}$)的理论仿真结果,实验结果和理论仿真结果较为吻合,证明所提方法已经得到了与理论仿真一致的光学滤波器的频率响应。另外,实验中也测量了相移量和相移位置误差存在时的双相移光纤光栅滤波器的透射峰,如图 12 所示。图 12(a)为相移量误差为 0.022π 时的滤波器参数的变化,透射峰由一个平顶透射峰分离成两个透射峰,并且插入损耗、带宽和形状因子等参数也发生劣化,透射峰的插入损耗约为 16 dB ,

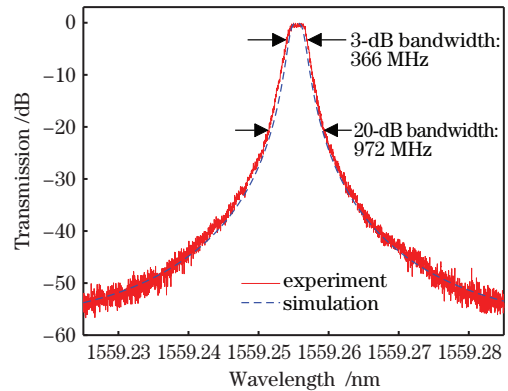


图 11 双相移光纤光栅的光谱图(加热温度为 $21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;加热位置为 $7.5, 15, 7.5\text{ mm}$)
Fig. 11 Spectra of the dual-phase-shifted FBG (temperature is $21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; heating position is $7.5, 15, 7.5\text{ mm}$)

3 dB 带宽约为 1181 MHz , 20 dB 带宽约为 2470 MHz ,形状因子约为 0.48 。图 12(b)为相移位置误差为 1.3 mm 时的滤波器参数的变化,透射峰的插入损耗增大为 $\sim 1.5\text{ dB}$, 3 dB 带宽增大为

~492 MHz, 20 dB 带宽增大为 ~1174 MHz, 形状因子增大为 ~0.42。与理论部分的分析一致, 滤波

器的插入损耗、带宽等关键参数随着相移量和相移位置误差的变大而显著劣化。

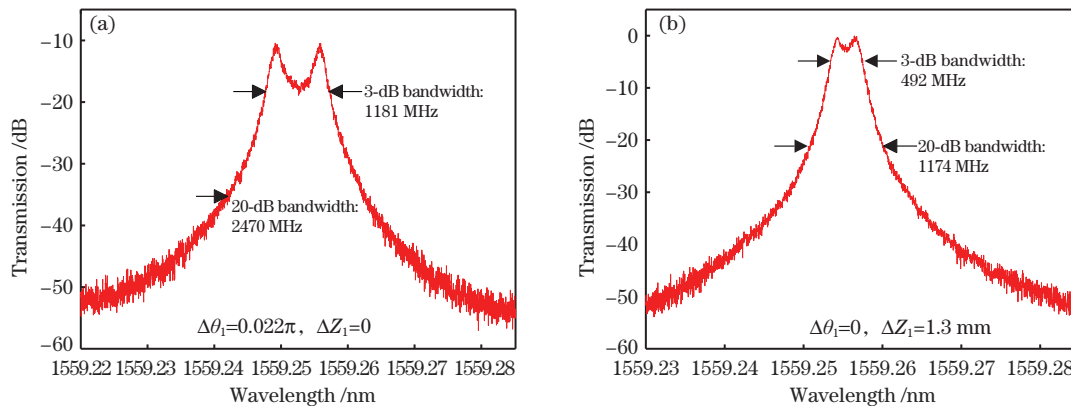


图 12 温度引起的相移量误差和相移位置误差对双相移光纤光栅的光谱特性的影响。(a) 相移量误差; (b) 相移位置误差

Fig. 12 Influence of phase shift amount error caused by temperature fluctuation and phase shift position error on the spectral characteristic of the dual-phase-shifted FBG. (a) Phase shift amount error; (b) phase shift position error

4 结 论

提出了一种利用局域温度控制在 FBG 中引入高精度相移制备 MPSFBG 的方法。分析了相移量误差和相移位置误差对 MPSFBG 滤波器损耗、带宽和形状因子的影响, 得到了 MPSFBG 获得插入损耗较小、矩形度较好的窄带平顶滤波响应需要的相移量精度 (0.0029π) 和相移位置精度 ($368 \mu\text{m}$)。随后, 通过特殊设计的局域温度控制结构, 利用 TEC 对均匀 FBG 进行局域温度控制可实现相移量精度为 0.0007π 和相移位置精度为 $30 \mu\text{m}$ 的相移, 满足了 MPSFBG 实现插入损耗较小、矩形度较高的窄带平顶滤波响应对相移精度的要求。基于所提方法制备的双相移光纤光栅滤波器的频率响应和理想情况下的理论拟合结果吻合, 得到了与理论仿真一致的光学滤波器的频率响应, 插入损耗约为 0.5 dB, 3 dB 带宽约为 366 MHz, 20 dB 带宽约为 972 MHz, 形状因子约为 0.38。所提制备 MPSFBG 滤波器的方法精确、简单、经济, 没有对光纤光栅的结构造成永久性的改变, 具有相移量可擦除的优势, 可进一步应用于制备光谱可重构的新型可调谐光纤滤波器。

参 考 文 献

[1] Sáez-Rodríguez D, Cruz J L, Díez A, et al. All-fiber noninterferometric narrow-transmission-bandpass filter [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4314-4316.
 [2] Wang Y F, Zhang S N, Wang D Y, et al. Nonlinear optical filter with ultranarrow bandwidth approaching the natural linewidth [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4059-4061.

[3] Liu Z Y, Tam H Y, Htein L, et al. Microstructured optical fiber sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3425-3439.
 [4] Zhang Z P, Niu X C, Huang J, et al. High-performance microwave photonic filter based on fiber ring resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2106001.
 张梓平, 牛晓晨, 黄杰, 等. 基于光纤环谐振腔的高性能微波光子滤波器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2106001.
 [5] You G H, Peng W J, Zou H. Research progress of frequency-swept fiber lasers based on optical filter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 010006.
 游关红, 彭万敬, 邹辉. 基于光学滤波器的扫频光纤激光器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 010006.
 [6] Wei W, Yi L L, Jaouën Y, et al. Bandwidth-tunable narrowband rectangular optical filter based on stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23249-23260.
 [7] Zou X, Li M, Pan W, et al. All-fiber optical filter with an ultranarrow and rectangular spectral response [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3096-3098.
 [8] Wang D, Ying K, Li W P, et al. Design and inscription of optical filters based on multi-phase-shifted fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2206002.
 王迪, 应康, 李文屏, 等. 多相移光纤光栅滤波器的设计与制备 [J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2206002.
 [9] Wei L, Lit J W Y. Phase-shifted Bragg grating filters with symmetrical structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1405-1410.

- [10] Bakhti F, Sansonetti P. Design and realization of multiple quarter-wave phase-shifts UV-written bandpass filters in optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1433-1437.
- [11] Kashyap R, Mckee P F, Armes D. UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibres using phase-shifted phase masks [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(23): 1977-1978.
- [12] Canning J, Sceats M G. Π -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(16): 1344-1345.
- [13] Wu L Y, 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.
- [14] Chen X X, Painchaud Y, Ogusu K, et al. Phase shifts induced by the piezoelectric transducers attached to a linearly chirped fiber Bragg grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(14): 2017-2022.
- [15] Falah A A S, Mokhtar M R, Yusoff Z, et al. Reconfigurable phase-shifted fiber Bragg grating using localized micro-strain [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(9): 951-954.
- [16] Zhou X J, Shi S H, Zhang Z Y, et al. Mechanically-induced π -shifted long-period fiber gratings [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6253-6259.
- [17] Li S Y, Ngo N Q, Tjin S C, et al. Thermally tunable narrow-bandpass filter based on a linearly chirped fiber Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(1): 29-31.
- [18] Ngo N Q, Liu D, Tjin S C, et al. Thermally switchable and discretely tunable comb filter with a linearly chirped fiber Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 2994-2996.
- [19] Kondo Y, Nouchi K, Mitsuyu T, et al. Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(10): 646-648.
- [20] Wang D, Pi H Y, Li X, et al. Measurement and analysis of loss in fiber Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0606004.
王迪, 皮浩洋, 李璇, 等. 光纤布拉格光栅损耗特性的测量与分析 [J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0606004.
- [21] Wang D, Li X, Pi H Y, et al. Interference field behind phase mask and its influence on the loss characteristic in fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0806002.
王迪, 李璇, 皮浩洋, 等. 相位掩模板干涉场及其对光纤光栅损耗的影响 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0806002.
- [22] Wang D, Ding M, Pi H Y, et al. Influence of intracavity loss on transmission characteristics of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2): 024207.

High-Precision Multiphase Shifts Generation and Filter Fabrication Based on Grating Local Temperature Control

Liang Hong^{1,2}, Ying Kang^{1*}, Wang Di³, Wei Jinjin³, Li Xuan¹,
Pi Haoyang¹, Wei Fang¹, Cai Haiwen^{1,2**}

¹ *Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

² *Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³ *National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology-Xi'an, Xi'an, Shaanxi 710100, China*

Abstract

Objective Ultranarrow bandpass optical filters are key components for signal processing in the fields of microwave photonics, dense wavelength-division multiplexing, coherent communication, and optical fiber sensing. The ideal ultranarrow bandpass optical filter has a rectangular frequency response composed of an ultraflat passband and a very steep edge. The flat passband has high signal fidelity and can prevent the signal from being distorted, whereas the steep edge can suppress the crosstalk between the adjacent bands. Fiber Bragg gratings (FBG) that achieve various frequency responses are commonly used in bandpass optical filters owing to their small size, anti-electromagnetic

interference, low insertion loss, and compatibility with other optical fiber devices and systems. However, the ordinary uniform FBG bandwidth is relatively large, in a dozen GHz or hundred GHz. Although the phase-shifted fiber Bragg grating can achieve a bandwidth below 100 MHz, its Lorentz or quasi-Lorentz line frequency response limits its application in high-resolution signal processing. Recently, the multiphase-shifted FBG (MPSFBG) containing multiple phase shifts have been used to design the ultranarrow bandpass optical filters. The MPSFBG can obtain the narrow band flat-top filter response with small insertion loss and good rectangularity by optimizing the position of each π phase shift. In actual preparation, there are errors in the control of the phase-shift amount and phase-shift position, which result in the difference between the actual optical spectra and theoretically calculated optical spectra under ideal conditions. Therefore, the introduction of a high-precision phase shift is the key to the fabrication of the MPSFBG.

Methods This study presents a method for fabricating the MPSFBG by introducing a high-precision phase shift into the FBG using local temperature control. First, the influence of the phase-shift amount and position errors on the insertion loss, bandwidth, and shape factor of the MPSFBG filter is analyzed in the theoretical part of this study, and the phase-shift amount and position precision required by the MPSFBG to obtain the narrow band flat-top filter response with small insertion loss and good rectangularity are obtained. In the experimental part, the principle of introducing a phase shift into the FBG using the local temperature control scheme is analyzed, and the structure for local temperature control is designed. The phase-shift amount and position precision achieved using the designed local temperature control structure in uniform FBG are experimentally measured. Finally, a dual-phase-shifted FBG is fabricated using this method. In addition, its frequency response is measured.

Results and Discussions The method proposed in this study uses local temperature control to introduce high-precision phase shifts into the FBG to assist the MPSFBG in achieving a phase-shift amount and position precision of 0.0007π and $30 \mu\text{m}$, respectively (Fig. 9 and Fig. 10). This precision meets the phase-shift precision required by the MPSFBG in the theoretical analysis to obtain the narrow band flat-top filter response with small insertion loss and good rectangularity. In addition, this phase-shift erasing is possible because the phase shifts introduced by it do not permanently change the structure of the FBG, providing an efficient and economical method for fabricating the MPSFBG. The frequency response of the dual-phase-shifted FBG filter fabricated using this method is consistent with the theoretical fitting result under ideal conditions, and the insertion loss of about 0.5 dB, 3 dB bandwidth of about 366 MHz, 20 dB bandwidth of about 972 MHz, and shape factor of about 0.38 are realized (Fig. 11).

Conclusions In this study, a method for fabricating an MPSFBG filter using high-precision phase-shift control technology based on local temperature control is presented. First, in the theoretical part of this study, the effect of the amount and position errors of the phase shifts on the insertion loss, bandwidth, and shape factor of the MPSFBG filter is analyzed. The amount precision (0.0029π) and position precision ($368 \mu\text{m}$) requirements of the phase shifts are obtained for the MPSFBG achieving the narrow band flat-top filter response with low insertion loss and good rectangularity. The experimental part confirmed the feasibility of using local temperature control to introduce the high-precision phase shifts (phase-shift amount precision is 0.0007π , phase-shift position precision is $30 \mu\text{m}$). Finally, the MPSFBG is fabricated using this method, and its optical spectrum is tested and theoretically simulated. The results show that the frequency response of the MPSFBG filter fabricated using this method is close to the ideal filter characteristics from the theoretical simulation, and insertion loss of about 0.5 dB, 3 dB bandwidth of about 366 MHz, 20 dB bandwidth of about 972 MHz, and the shape factor of about 0.38 are realized. The method proposed in this study for fabricating the MPSFBG is accurate, simple, and economical. Moreover, the phase shifts generated using this method do not result in permanent changes to the structure of the FBG; thus, it is erasable, which can be used to fabricate the new tunable fiber filters.

Key words fiber optics; optical fiber device; multiphase shifted fiber Bragg grating; local temperature control; optical filter

OCIS codes 060.2310; 060.2340; 060.3735; 070.2615