

多相移光纤光栅滤波器的设计与制备

王迪¹, 应康², 李文屏^{3*}, 张武¹, 龚静文¹, 梁栋¹, 蒋炜¹, 谭庆贵¹, 李小军¹

¹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;

²中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

³北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 对多相移光纤光栅滤波器的光谱进行了理论仿真。理论结果证明:通过精确设计多相移光纤光栅的相移点数目、相移位置分布、耦合系数、长度等参数,可以获得窄带平顶滤波响应的光谱;而实际制备中引入的误差会导致滤波器光谱性能恶化。随后采用紫外辐照后处理的方式,制备了多相移光纤光栅滤波器,并对其光谱进行了测试。结果表明:当多相移光纤光栅滤波器带宽较宽时,实测光谱与理想仿真结果较为吻合;增大耦合系数以减小带宽时,滤波器的性能对工艺误差更敏感。最后对误差项进行了深入的分析与讨论,结果证明,采用较长的多相移光纤光栅可以有效地增大相移点位置和相移差的容限,减弱光致损耗对其性能的影响。

关键词 光纤光学; 多相移光纤光栅; 紫外辐照后处理; 微波光子信号处理

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2206002

Design and Inscription of Optical Filters Based on Multi-Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings

Wang Di¹, Ying Kang², Li Wenping^{3*}, Zhang Wu¹,

Gong Jingwen¹, Liang Dong¹, Jiang Wei¹, Tan Qinggui¹, Li Xiaojun¹

¹National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave,

China Academy of Space Technology-Xi'an, Xi'an, Shaanxi 710100, China;

²Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800, China;

³Beijing Institute of Tracking and Telecommunication, Beijing 100094, China

Abstract First, the spectral characteristics of multi-phase-shifted fiber Bragg gratings (MPSFBGs) were studied theoretically. The results confirmed that we could acquire the spectra with narrowband flat-top filter response by accurately designing the key parameters of the MPSFBGs, such as the number and position distribution of phase shifts, the coupling coefficient and length of the gratings. However, the process errors introduced in the inscription process would worsen the filter spectra. To this end, MPSFBGs were inscribed by a post-ultraviolet-radiation technique and the relevant spectra were measured. The results demonstrate that the experimental spectra are in agreement with the ideal simulation results when the MPSFBGs have a large bandwidth, indicating that the control accuracy can meet the requirements of the gratings. However, the performance of the narrow-bandwidth filter with a larger coupling coefficient is more sensitive to the process errors. Furthermore, the process errors were analyzed and discussed. It turns out that increasing the length of MPSFBGs can effectively widen the tolerance of phase-shift position distribution, and phase-shift difference, and weaken the effect of UV-induced loss on the loss characteristic of the filters.

Key words fiber optics; multi-phase-shifted fiber Bragg gratings; post-ultraviolet-radiation; microwave photonic signal process

OCIS codes 060.2340; 060.3735; 070.2615

收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2020-07-21; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61805260)、上海市扬帆计划(18YF1426100)、上海市自然科学基金(18ZR1444300)、重点实验室基金(6142411185101)、钱学森青年创新基金

* E-mail: 89445830@qq.com

1 引 言

光学滤波器作为一个基础的信号处理单位,在光通信、光学传感、激光雷达、微波光子学中均有很大的应用需求^[1-3]。由于光学器件具有处理高频、宽带信号的能力,并且具有抗电磁干扰的优势,采用光学方法处理微波信号已经成为了研究热点。在一些微波光子滤波器和微波光子信道化技术中,光学滤波器成为了其中的关键器件^[4-7]。在这些方案中,光学滤波器的性能参数直接决定了信号的质量。为了降低带宽内信号失真和其他信道的串扰,要求光滤波器具有带内平坦、带外抑制比高的矩形频谱响应。现有的光学滤波器包括衍射光栅、光纤光栅、法布里-珀罗标准具、微环谐振器和基于受激布里渊散射的光滤波器等。其中光纤光栅以其插入损耗小、成本低和尺寸小的优势,获得了研究人员的广泛关注。光纤光栅最基本的结构是光纤布拉格光栅(FBG),FBG通过切趾技术易于获得矩形度良好的频谱响应,但是FBG的带宽较大,一般在几十GHz甚至几百GHz量级,不适用于射频信道化技术。相移光纤光栅(PSFBG)会在光栅反射带内打开一个透射窗口,这个透射峰的带宽可以达到100MHz以下,但是这种滤波器的频率响应为洛伦兹线型或者准洛伦兹线型^[8]。基于法布里-珀罗标准具和受激布里渊散射的滤波器也可以得到很窄的滤波通带,但是与PSFBG相同,均难以得到良好的矩形度^[5]。可以看出传统的滤波器难以同时得到窄带宽和高矩形度的频谱响应。为克服这一限制,国内外科研人员已经做了大量的研究工作。Taddei等^[9]采用8个级联的微环得到带宽为72MHz,带外抑制比为51dB的平顶滤波器。但是由于该滤波器的自由光谱范围(FSR)仅为1.4GHz,限制了其调谐范围,而且需要将波导与光纤进行耦合,引入了额外的损耗。而在

基于受激布里渊散射的光滤波器中,可以通过泵浦光频谱展宽的方式实现矩形滤波响应^[10-11]。然而这种结构的滤波器存在结构复杂、成本高的问题。另外,Zou等^[12-13]在光纤光栅中插入多个相移点,制备出了基于多相移光纤光栅的窄带平顶滤波器,这种方法同样适用于硅基波导布拉格光栅。但是多相移光纤光栅的结构复杂,导致成品率低,大大增加了其成本。本文对多相移光纤光栅的光谱进行了理论仿真,分析了关键参数对滤波器性能的影响,并且采用紫外辐照后处理的方式制备了多相移光纤光栅,随后根据理论和实验结果对误差项进行了深入的分析与讨论。

2 理论分析与数值仿真

图1给出MPSFBG的结构示意图,从图中可以看出1个MPSFBG中具有 n 个相移点,这些相移点将光纤光栅分成了 $n+1$ 段子光纤光栅段和 n 个相移段,根据耦合模方程的传输矩阵法^[14],此MPSFBG的光谱可表示为

$$\begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \prod_{i=2}^{n+1} \begin{bmatrix} T_{11}^{(i)} & T_{12}^{(i)} \\ T_{21}^{(i)} & T_{22}^{(i)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(j\varphi_{i-1}) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_{i-1}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{11}^{(1)} & T_{12}^{(1)} \\ T_{21}^{(1)} & T_{22}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ r \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} T_{11}^{(i)} = \cosh(\sigma\Delta z_i) + j(\delta/\sigma)\sinh(\sigma\Delta z_i) \\ T_{12}^{(i)} = j(\kappa/\sigma)\sinh(\sigma\Delta z_i) \\ T_{21}^{(i)} = -j(\kappa/\sigma)\sinh(\sigma\Delta z_i) \\ T_{22}^{(i)} = \cosh(\sigma\Delta z_i) - j(\delta/\sigma)\sinh(\sigma\Delta z_i) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: t 是MPSFBG的透射系数; r 是MPSFBG的反射系数; φ_{i-1} 是第 $i-1$ 个相移段的相移值; Δz_i 是第 i 个光栅段的长度; $\kappa = \frac{1}{2}k_0\Delta n$ 是光栅的耦合系数; $\sigma = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2}$,其中 δ 是波长的失谐量。

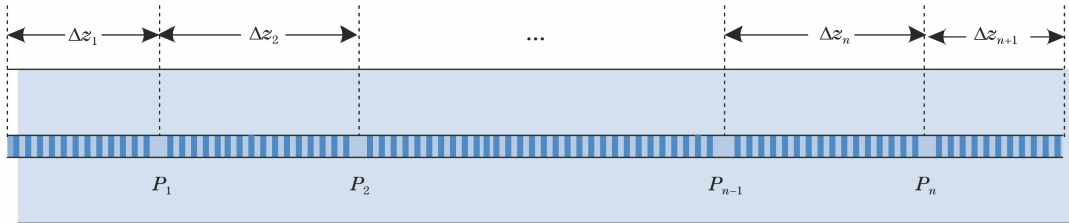


图1 MPSFBG的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an MPSFBG

众所周知,光纤布拉格光栅为带阻滤波器。在一个均匀光纤布拉格光栅的正中间插入一个 $\pi/2$ 的相移,构成一个谐振腔,其谐振波长位于光栅的布拉

格波长处,从光谱上来看这一谐振腔将在阻带内打开一个窄带透射峰,这个窄带透射峰可以用作带通滤波。根据(1)式和(2)式,可以得到多相移光纤光

栅的光谱。图 2 中的实线、虚线和点线分别表示具有 2、4 和 6 个相移点的多相移光纤光栅的光谱图。由图 2(a)的结果可以看出,当 n 个 $\pi/2$ 相移等间隔地插入 FBG 中时,阻带内将出现 n 个透射峰。如果

将最外面的两段光栅段延长,这些透射峰的波长间隔将增大,如图 2(b)所示。优化各个相移点的位置可以使得所有的透射峰融合成一个平顶的透射峰,如图 2(c)所示。

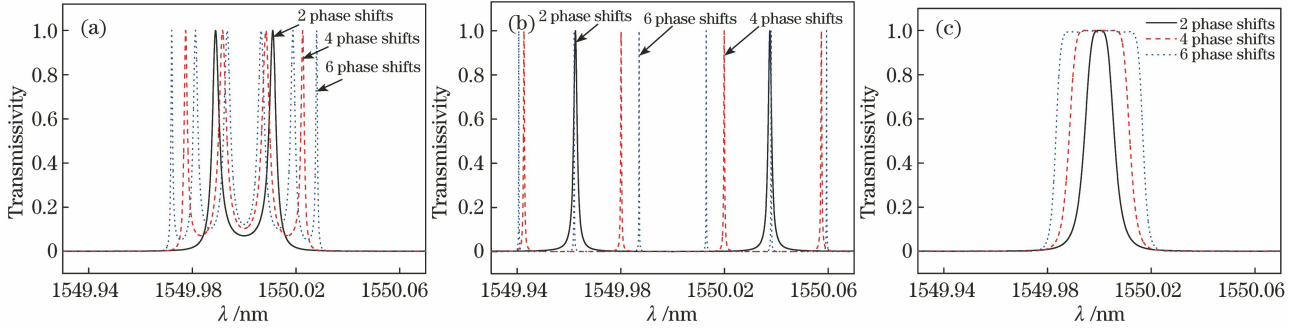


图 2 具有 2、4 和 6 个相移点的多相移光纤光栅的光谱图。各光栅段的长度比值分别为 (a) 1:1:1, 1:1:1:1:1:1, 1:1:1:1:1:1:1; (b) 3:1:3, 3:1:1:1:3, 3:1:1:1:1:3; (c) 1:2:1, 1:2.3:2.6:2.3:1, 1:2.2:2.6:2.7:2.6:2.2:1
Fig. 2 Spectra of MPSFBGs with 2, 4, and 6 phase shifts. The ratios of the lengths of subgratings are (a) 1:1:1, 1:1:1:1:1:1, 1:1:1:1:1:1:1; (b) 3:1:3, 3:1:1:1:3, and 3:1:1:1:1:3; (c) 1:2:1, 1:2.3:2.6:2.3:1, and 1:2.2:2.6:2.7:2.6:2.2:1, respectively

这种平顶的频谱响应在微波光子滤波器中具有重要的应用。要获得一个单通平顶滤波响应,需要优化各个相移点的位置。根据上述理论模型,计算了当平顶滤波器的带内波动小于 0.2 dB 时,2~8 个相移光纤光栅中各个子光纤光栅段的长度比值,如表 1 所示。

表 1 多相移光纤光栅中各个子光栅段的长度比值
Table 1 Ratios of the lengths of each subgratings in the MPSFBGs

| Number of phase shifts | Ratio |
|------------------------|--------------------------------------|
| 2 | 1:2:1 |
| 3 | 1:2.25:2.25:1 |
| 4 | 1:2.3:2.6:2.3:1 |
| 5 | 1:2.25:2.55:2.55:2.25:1 |
| 6 | 1:2.25:2.55:2.6:2.55:2.25:1 |
| 7 | 1:2.2:2.48:2.55:2.55:2.48:2.2:1 |
| 8 | 1:2.15:2.48:2.6:2.63:2.6:2.48:2.15:1 |

当光栅长度为 100 mm,透射峰带宽为 500 MHz 时,多相移光纤光栅的光谱如图 3(a)所示。图 3(b)为形状因子 g (20 dB 与 3 dB 带宽的比值)和相移点位置容限 δl_1 (为了保证信号质量,滤波器的带内波动或者插入损耗应该控制在一定范围内,本文以 1 dB 为例)随着相移数目 N 的变化曲线。可以看出随着相移点数目增加,透射峰的形状因子变小,

同时相移点位置的容限也会变小。从图 3 中还可以看出,当相移点数目为 8 时,透射峰的带内波动较明

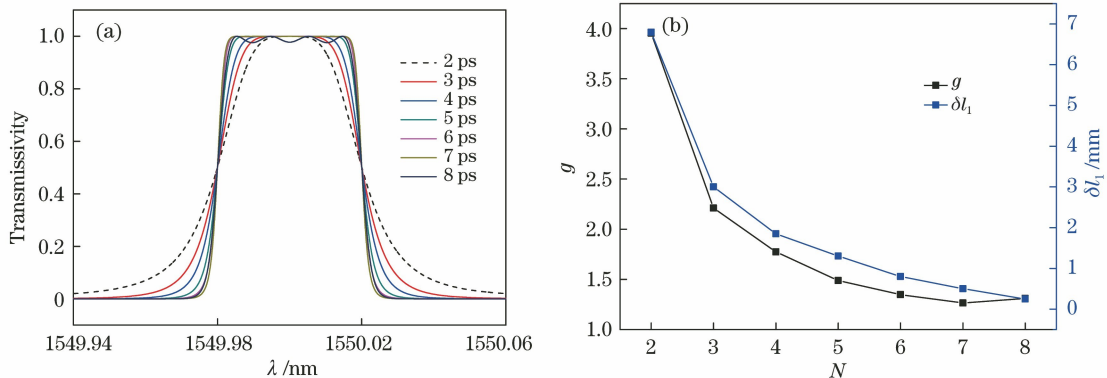


图 3 不同相移点数下滤波器 3 dB 带宽为 500 MHz 的多相移光纤光栅光谱与参数变化曲线。(a) 多相移光纤光栅的光谱; (b) 形状因子 g 与相移点位置容限 δl_1 随着相移数目 N 的变化趋势

Fig. 3 Simulated transmission spectra and parametric curves of MPSFBGs with different number of phase shifts when the 3 dB bandwidth of filters is 500 MHz. (a) Spectra of MPSFBGs; (b) shape factor of filter and the tolerance of phase shifts location versus the number of phase shifts of MPSFBG

显,且形状因子也比7个相移点时大。这是由于此时相移点位置的容限太小,参数未调到最优的结果所致。而实际制备时,更容易引入误差,因此在设计多相移光纤光栅时需要综合考虑形状因子与现有的工艺水平来选择相移数。

带宽、形状因子是衡量滤波器特性的重要参数指标。下面以双相移光纤光栅为例,分析光纤光栅参数对滤波器带宽和形状因子的影响。从图4(a)可以看出,光栅总长度保持不变时,随着耦合系数 κ

增大,光纤光栅的反射率增大,则多相移光纤光栅光谱中间的透射峰带宽减小,即滤波器的带宽随着多相移光纤光栅的耦合系数 κ 的增大而减小。从图4(b)可以看出,滤波器的形状因子也随着光栅耦合系数 κ 的增大而减小。从图5可以看出,当光纤光栅的耦合系数与长度的乘积 κl 不变时,随着长度增大,滤波器的带宽减小。而形状因子只与 κl 有关。所以对于相同的形状因子,可以通过增加光栅的长度来减小滤波器的带宽。

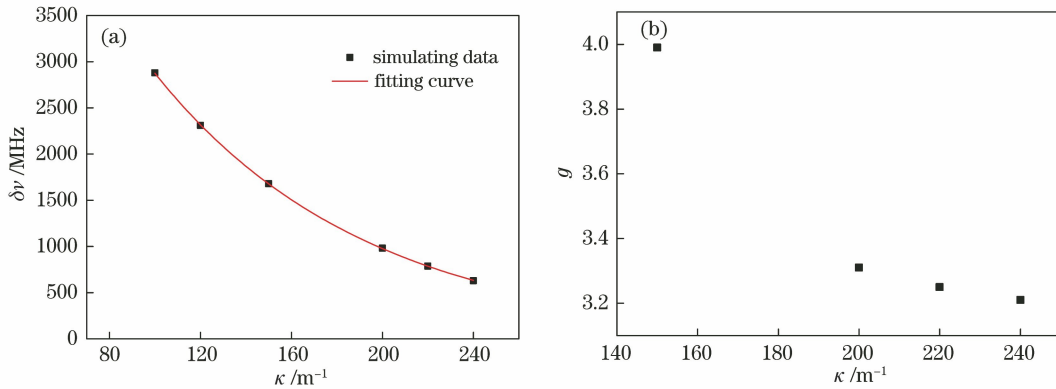


图4 光栅长度 $l=30$ mm 时,滤波器带宽 $\delta\nu$ 和形状因子 g 随着 MPSFBG 耦合系数 κ 的变化曲线。(a)滤波器带宽;(b)形状因子
 Fig. 4 Bandwidth and shape factor of filter versus coupling coefficient κ of MPSFBG when the length of MPSFBG is 30 mm. (a) Bandwidth; (b) shape factor

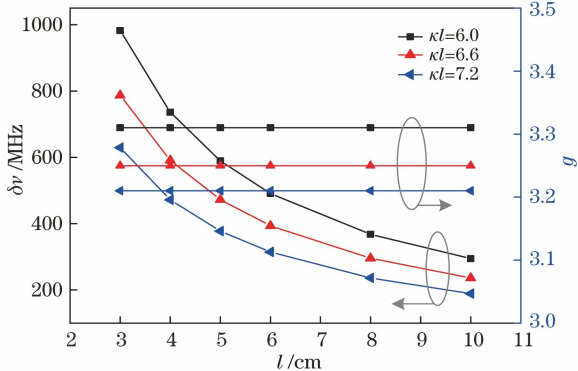


图5 滤波器带宽 $\delta\nu$ 和形状因子 g 随着 MPSFBG 长度 l 的变化曲线

Fig. 5 Bandwidth of filter and shape factor of filter versus coupling length l of MPSFBG

实际制备过程中存在一些工艺误差或缺陷,如相移点位置和相移量控制精度不够高,将导致实际光谱与理想情况存在差异。因此下面以双相移光纤光栅为例,对实验中可能存在的工艺误差或缺陷进行分析。

对于双相移光纤光栅,要获得平坦的单通滤波响应,三段子光纤光栅的长度比设为1:2:1。当两端的子光纤光栅的长度变短时,透射峰的透过率下降,误差越大,透过率越小。如图6(a)所示,可以看

到当子光纤光栅长度比为23:54:23时,透过率约为-1.59 dB,当长度比为20:60:20时,透过率约为-7.9 dB。而当两端的子光纤光栅的长度变长时,两个透射峰逐渐分离,出现带内波动。从图6(b)可以看出,当两个相移存在微弱差异时,随着相移之间的差值增大,透射峰的损耗增加。当相移差较大时,透射峰直接分离成两个插入损耗很大的透射峰。谐振波长与相移量有关,当相移量相等时,两个谐振波长一致,多相移光纤光栅构成了级联谐振腔结构,可以得到一个平坦的透射峰;而当两个相移量不同时,两个谐振波长逐渐分离,两个谐振腔在这两个谐振波长处不存在耦合,此时可以看作两个分立的相移光纤光栅,这是由于结构的非对称性也会导致两个透射峰的插入损耗变大。同样,对于其他多相移光纤光栅,当存在相移位置偏差或者相移量误差时,透射峰的带内波动或者插入损耗、形状因子等性能也会随之恶化。

从上述理论分析可知,通过对多相移光纤光栅的相移点数目、相移位置分布、相移量、耦合系数、长度等参数的精确设计,得到了窄带平顶滤波响应。同时应该在制备时考虑如何尽量降低工艺误差,或者在设计时考虑如何降低此工艺误差对滤波特性的影响。

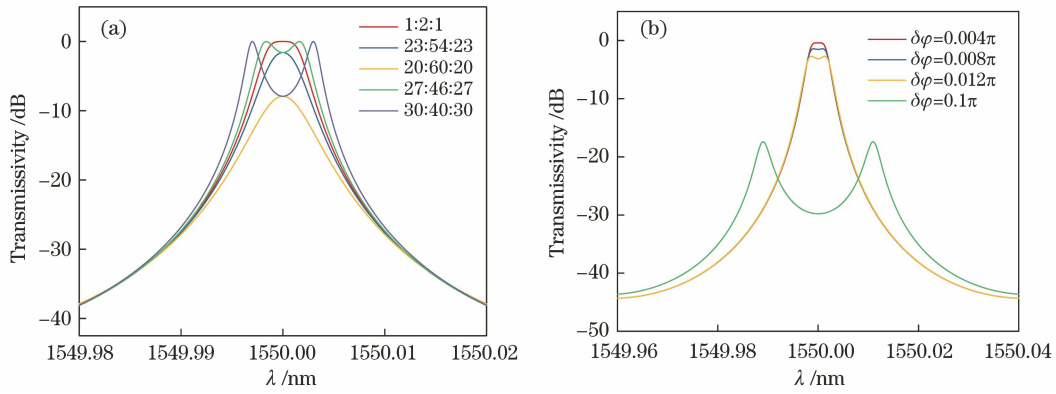


图 6 不同工艺误差对双相移光纤光栅光谱的影响。(a)光纤光栅长度比;(b)相移 $\delta\varphi$

Fig. 6 Influence of process errors on the spectrum of double-phase-shifted FBG. (a) Length ratio of fiber grating; (b) phase shifts $\delta\varphi$

3 实验结果与讨论

在实验中,采用紫外辐照的后处理方式制备多相移光纤光栅,具体的刻写方法如图 7 所示。首先采用如图 7(a)所示的传统相位掩模板法刻写一个长度为 l 的均匀光纤光栅,然后再用一个具有 n 个铝制光阑(光阑宽度为 1 mm)的掩模板对光纤光栅进行局部紫外辐照。经过紫外辐照后的区域的有效折射率与其他区域不同,在该区域引入了相移。根据实际经验,可知当紫外光的单脉冲能量为 95 mJ 时,要引入 $\pi/2$ 相移大约需要经过 7200 个脉冲光辐

照,即理想情况下相移量的控制精度为 $7 \times 10^{-5} \pi$ 。采用分次辐照的方式依次引入多个相移,采用高精度光谱仪对多相移光纤光栅刻写过程实时监测,实现了多相移光纤光栅的高精度相移控制。一般当透射峰完全融合后,认为相移量一致。但是受光谱仪观测精度的限制,目前相移控制精度还没有达到理想的效果。刻写光栅采用的光纤是载氢的康宁 SMF-28 光纤,紫外辐照光源为输出波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器,相位掩模板周期为 1067.85 nm,长度为 30 mm, ± 1 阶衍射效率大于 40% @ 248 nm。在光纤光栅的刻写过程中,采

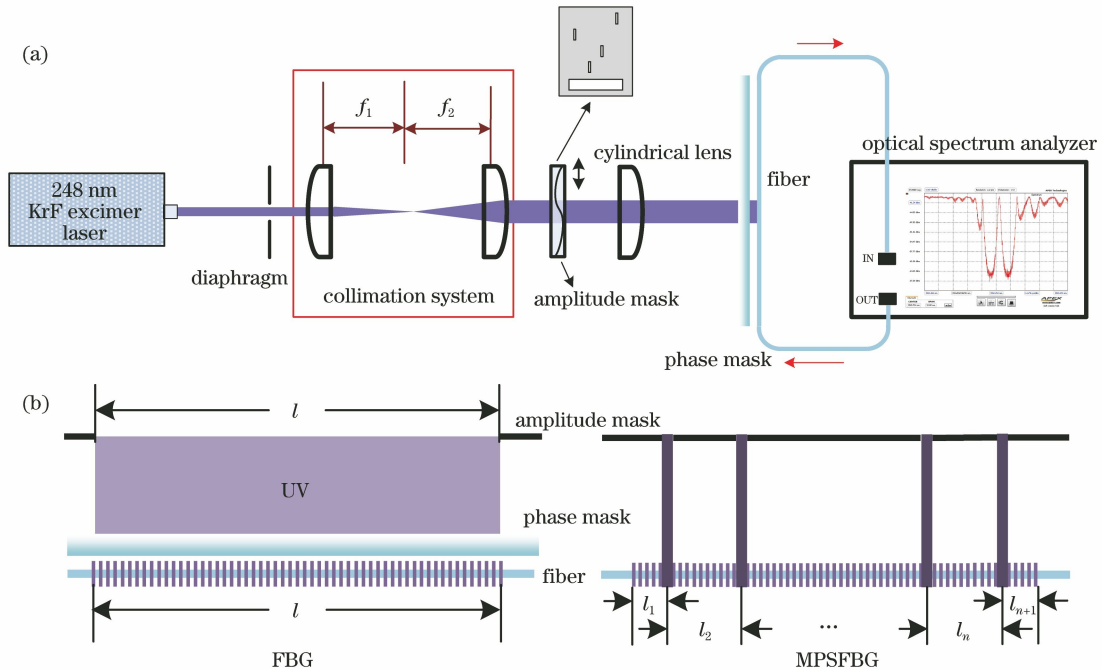


图 7 实验原理。(a)相位掩模板法刻写系统示意图;(b) MPSFBGs 刻写方法的示意图

Fig. 7 Experimental principle. (a) Schematic of inscription system with the phase mask; (b) schematic diagram of MPSFBGs inscription

用分辨率为 0.04 pm (5 MHz) 的光谱仪 (APEX Technologies, AP-2041B) 监测 MPSFBG 的透射谱, 光源采用的是该光谱仪自带的线宽为 500 kHz 的光源。

采用该方法制备长度为 30 mm 的双相移光纤光栅, 相移点的具体位置根据表 1 选取。从图 6(a) 可以看出, 当相位点的位置存在偏差时, 滤波器的光谱特性会受到影响。当光栅总长度为 30 mm 时, 相移点位置误差容限 δl_1 随着线宽的变化曲线如图 8 所示, 可以看出此时位置误差与带宽呈线性关系, 带宽越窄, 位置误差的容限越小。即使制备带宽为

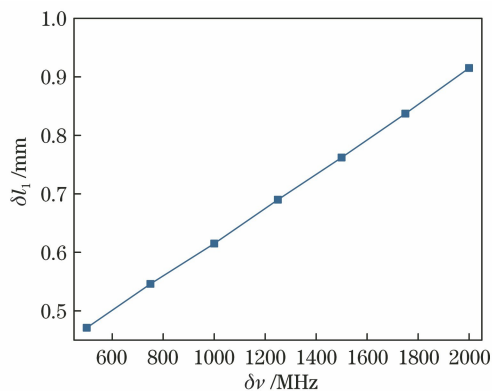


图 8 相移点位置精度容限随着透射峰带宽的变化曲线
Fig. 8 Tolerance of phase shifts position versus the bandwidth of transmission peak

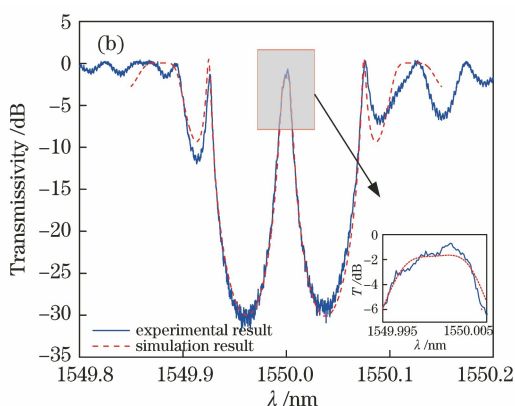
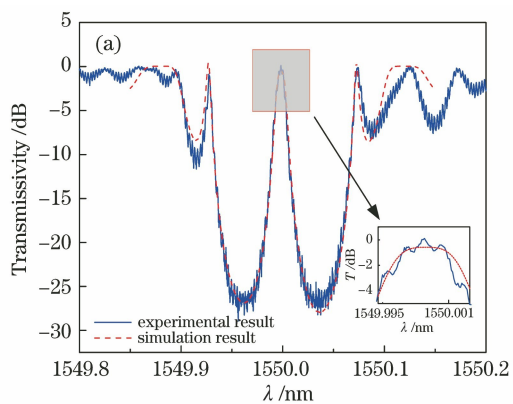


图 9 实验中制备的双相移光纤光栅光谱图。(a) 引入相移误差前; (b) 引入相移误差后

Fig. 9 Spectra of double-phase-shifted FBG prepared. (a) Without phase shift error; (b) with phase shift error

由于实验室最长的相位掩模板为 30 mm, 为了获得带宽更窄的滤波器, 需要刻写反射率 (耦合系数) 更大的 FBG。但是随着耦合系数的增大, 光纤光栅的损耗会增大, 而且腔内的损耗增强效应也会增大。另一方面滤波器的性能也会变得对工艺误差更敏感。如图 10 所示, 当光栅总长度为 30 mm 时, 相移差的容限随着透射峰带宽的减小而变小。当带

500 MHz 的双相移光纤光栅, 位置误差的容限也仅需约 350 μm , 从目前工业加工角度来讲, 这一精度是满足工业加工要求的。

实验中制备了两根带宽约为 1 GHz 的双相移光纤光栅, 透射谱如图 9 所示, 并对这两根光栅的光谱进行拟合。根据之前的研究结果, 可知刻写光纤光栅时会引入损耗^[15-16]。相移光纤光栅和光纤光栅法布里-珀罗腔中存在损耗增强效应, 这与 FBG 的反射率有关, 反射率越高, 谐振效应越明显, 透射峰对损耗的增强作用就越显著, 因此可将损耗系数代入仿真模型中^[17]。图 9(a) 拟合参数分别是: 耦合系数为 180 m^{-1} , 光栅长度为 30 mm, 光纤光栅的损耗系数为 0.72 m^{-1} , 两个相移点的相移量均为 0.51π 。此时透射带的 3 dB 带宽为 1.06 GHz, 20 dB 带宽为 4.03 GHz, 滤波器的形状因子为 3.8, 带内波动小于 1 dB, 透射峰损耗也小于 1 dB。实验结果显示, 理论结果与实验结果非常吻合, 这说明实验中的加工精度和相移控制精度均可以满足当前的实验要求。图 9(b) 是引入相移误差后的双相移光纤光栅的光谱。拟合参数分别是: 耦合系数为 193 m^{-1} , 光栅长度为 30 mm, 光纤光栅的损耗系数为 0.72 m^{-1} , 两个相移点的相移量分别为 0.51π 、 0.492π 。可以看出, 两个相移之间仅相差 0.018π 时, 透射带的插入损耗增加到 1.7 dB。

宽为 500 MHz 时, 相移差的容限约为 0.00645π 。

图 11 是耦合系数为 225 m^{-1} , 光栅长度为 30 mm 时的双相移光纤光栅的光谱图, 此时理想情况下, 透射峰的 3 dB 带宽应该为 750 MHz, 20 dB 带宽为 2.42 GHz, 但是实际结果中, 透射峰的带宽为 1.01 GHz, 20 dB 带宽为 3.5 GHz, 而透射峰的透过率大约为 -5.5 dB , 即损耗大约为 5.5 dB。仿真

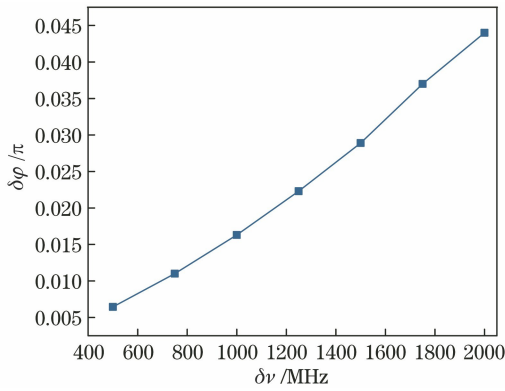


图 10 相移差容忍随着透射峰带宽的变化曲线

Fig. 10 Tolerance of differences between phase shifts versus bandwidth of transmission peak

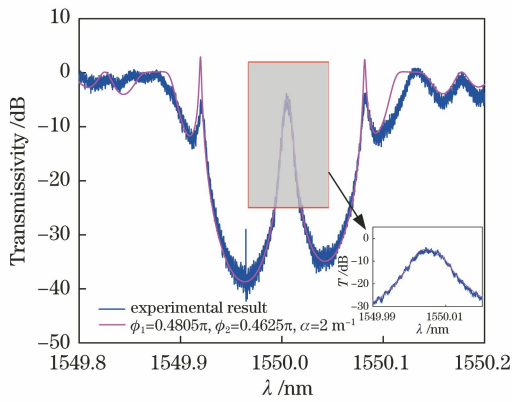


图 11 耦合系数为 225 m^{-1} , 光栅长度为 30 mm 时的双相移光纤光栅光谱图

Fig. 11 Spectrum of double-phase-shifted FBG with the coupling coefficient of 225 m^{-1} and the length of 30 mm

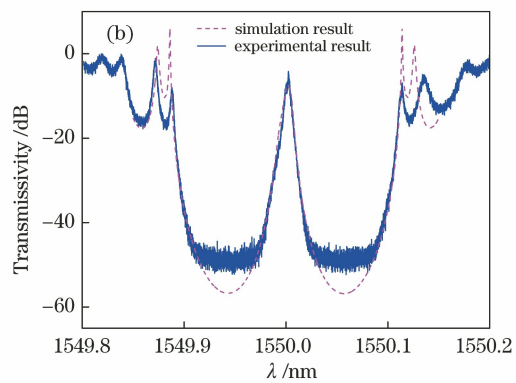
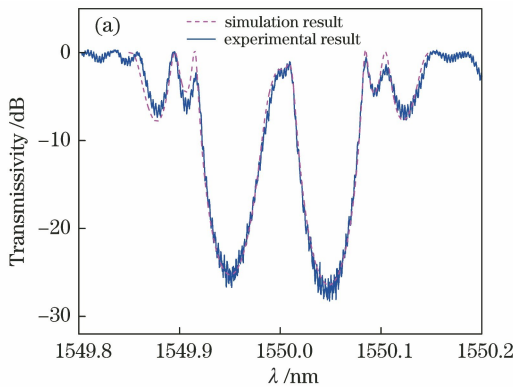


图 12 三相移光纤光栅光谱图。(a) 耦合系数为 225 m^{-1} , 光栅长度为 30 mm , 光纤光栅的损耗系数为 0.72 m^{-1} ; (b) 耦合系数为 330 m^{-1} , 光栅长度为 30 mm , 光纤光栅的损耗系数为 1 m^{-1}

Fig. 12 Spectra of triple-phase-shifted FBG with different parameters. (a) Coupling coefficient of 225 m^{-1} , the length of 30 mm , loss coefficient of 0.72 m^{-1} ; (b) coupling coefficient of 330 m^{-1} , the length of 30 mm , loss coefficient of 1 m^{-1}

为了优化滤波器的性能,在制备时需考虑如何尽量降低这些误差,在设计时需考虑如何降低此工

结果表明,当损耗系数 α 为 2 m^{-1} ,两个相移点的相移量差值为 0.018π 时,相移量偏差和光栅损耗的共同作用使窄带透射峰的透过率显著变小,这与实验结果相吻合。

图 12 为三相移光纤光栅的光谱图。图 12(a) 的拟合参数分别是:耦合系数为 183 m^{-1} ,光栅长度为 30 mm ,光纤光栅的损耗系数为 0.72 m^{-1} ,三个相移点的相移量分别为 $0.5525\pi, 0.4775\pi, 0.4925\pi$ 。此时透射带的 3 dB 带宽为 3.12 GHz , 20 dB 带宽为 7.9 GHz ,滤波器的形状因子约为 2.5 ,带内波动小于 1 dB ,透射峰损耗大约为 2 dB 。可见三相移光纤光栅的形状因子优于双相移光纤光栅,与理论吻合。图 12(b) 的拟合参数分别是:耦合系数为 330 m^{-1} ,光栅长度为 30 mm ,光纤光栅的损耗系数为 1 m^{-1} ,三个相移点的相移量分别为 $0.53\pi, 0.491\pi, 0.49\pi$ 。此时透射带的 3 dB 带宽为 683 MHz , 20 dB 带宽为 2.72 GHz ,滤波器的形状因子约为 3.98 ,带内波动大于 4 dB ,透射峰损耗约为 5 dB 。从这一结果可以看出,当耦合系数增大时,透射峰损耗明显增大,这与双相移光纤光栅的模拟结果一致。如前所述,当相移量不同时,谐振波长逐渐分离,几个谐振波长处不存在耦合,此时可以看作是分立的相移光纤光栅,由于左右两侧相移光纤光栅不对称,两个透射峰的插入损耗变大,而中心相移点所构成的结构类似于常规相移光纤光栅,插入损耗最小,因此此时透射峰的顶部较为尖锐,带内波动变大且形状因子变大。同时从实验结果也可以看出,当光纤光栅耦合系数增大时,相移差容忍变小,这也与双相移光纤光栅的结果一致。

艺误差对滤波特性的影响。从图 13(a) 可以看出,当透射峰的带宽为 500 MHz 时,相移点位置误差

δl_1 随着光纤光栅总长度的增加而增大。另外相移差的容限也会随着光纤光栅总长度的增加而增大, 如图 13(b)所示。当光栅长度为 100 mm 时, 制备

带宽为 500 MHz 的滤波器需要将相移差控制在 0.0336π 以内, 相比于 30 mm 时的 0.0065π , 降低了制作难度。

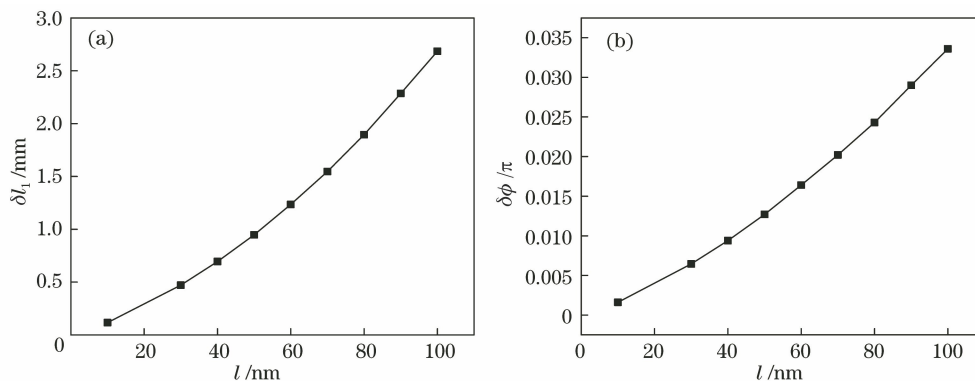


图 13 相移点位置精度容限和相移差容限随光纤光栅总长度的变化曲线。(a)相移点位置精度容限;(b)相移差容限

Fig. 13 Change in the tolerance of position of phase shifts and the tolerance of differences between phase shifts versus the length of the fiber gratings. (a) Tolerance of phase shifts position; (b) tolerance of differences

此外由于光致损耗与光纤光栅的耦合系数成正比, 以之前的测量值 $\alpha/\kappa = 0.012$ 为例, 计算了透射峰带宽为 500 MHz 时, 透射峰损耗与光纤光栅长度的关系^[15], 如图 14 所示, 透射峰损耗随着光栅长度增加呈指数衰减。这是由于双相移光纤光栅透射峰带宽一定时, 增加光栅长度可以减小耦合系数, 故光致损耗减小, 光栅的反射率也减小, 进而使得透射峰对损耗的增强作用减弱。

处理系统中的关键器件。多相移光纤光栅具有尺寸小、成本低、与光纤器件兼容的优势, 是获得这种滤波响应的重要方式。本研究对多相移光纤光栅的光谱进行了理论仿真, 分析了关键参数对滤波器性能的影响。结果表明, 当 n 个相移等间隔地插入 FBG 中时, 阻带内将出现 n 个透射峰。优化各个相移点的位置可以使得所有的透射峰融合成一个平顶的透射峰。此平顶透射峰可用于平顶带通滤波。当透射峰的带宽相同时, 相移数目越多, 光谱的矩形度越好。理论分析结果还表明, 增加光栅的长度可以减小滤波器的带宽, 同时不改变滤波器的形状因子。实验结果显示, 当刻写较宽的多相移光纤光栅滤波器时, 实验结果与理想仿真结果较为吻合, 说明此时的加工精度满足当前的实验要求。但是通过增大耦合系数的方式减小滤波器带宽后, 滤波器的性能对工艺误差更敏感, 相移量控制精度不够高、光致损耗等工艺误差与缺陷会导致实际光谱难以达到理想效果。通过分析讨论可知, 采用较长的多相移光纤光栅可以有效地增大相移点位置误差和相移差的容限, 减弱光致损耗对其性能的影响。这些研究结果对多相移光纤光栅滤波器设计、制备, 以及提高其光谱性能和成品率具有重要的指导意义。

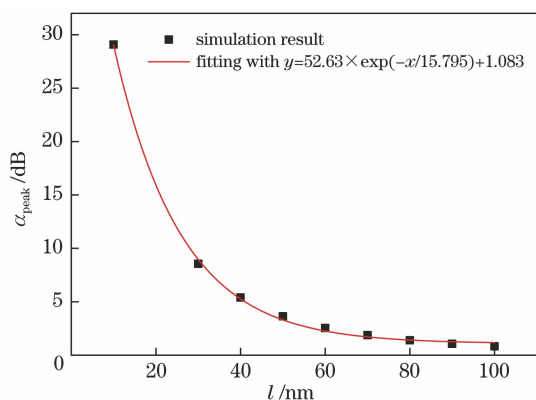


图 14 考虑光致损耗时, 透射峰损耗随着光栅总长度的变化曲线

Fig. 14 Loss of transmission peak versus length of the fiber gratings considering UV-induced loss

从上述分析中可以看出, 采用较长的双相移光纤光栅可以有效地增大相移点位置误差和相移差的容限, 减弱光致损耗对其性能的影响。此结论对于多相移光纤光栅具有普适性。

4 结 论

超窄带平顶矩形光滤波器是许多微波光子信号

参 考 文 献

[1] Ren Z B, Sun Y H, Zhang S Q, et al. Active optical switches based on polarization-tuned guided-mode resonance filters for optical communication[J]. Optics Communications, 2018, 426: 383-387.
 [2] Liu Z Y, Tam H Y, Htein L, et al. Microstructured

- optical fiber sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3425-3439.
- [3] Li W Z, Li M, Yao J P. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(5): 1287-1296.
- [4] Xu E M, Li F, Zhang Z X, et al. Microwave photonic filter with switched single and dual passbands[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0506003.
徐恩明, 李凡, 张祖兴, 等. 单双通带可切换的微波光子滤波器[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0506003.
- [5] Xie X J, Dai Y T, Ji Y, et al. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39-GHz optical frequency comb[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 661-663.
- [6] Zou X H, Li W Z, Pan W, et al. Photonic-assisted microwave channelizer with improved channel characteristics based on spectrum-controlled stimulated Brillouin scattering[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(9): 3470-3478.
- [7] Wang J J, Chen M H, Yu H C, et al. Photonic-assisted seamless channelization based on integrated three-stage cascaded DIs[C]//2013 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 28-31, 2013, Alexandria, VA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 21-24.
- [8] Poulin M, Painchaud Y, Aubé M, et al. Ultra-narrowband fiber Bragg gratings for laser linewidth reduction and RF filtering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7579: 75791C.
- [9] Taddei C, Zhuang L, Hoekman M, et al. Fullyrecon figurable coupled ring resonator-based bandpass filter for microwave signal processing [C] // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP) and the 2014 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP), October 20-23, 2014, Hokkaido, Japan. New York: IEEE, 2014: 44-47.
- [10] Eggleton B J, Poulton C G, Rakich P T, et al. Brillouin integrated photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(10): 664-677.
- [11] Yi L L, Wei W, Shi M Y, et al. Design and performance evaluation of narrowband rectangular optical filter based on stimulated Brillouin scattering in fiber[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(2): 336-344.
- [12] Zou X H, 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.
- [13] Porzi C, Serafino G, Velha P, et al. Integrated SOIhigh-order phase-shifted Bragg grating for microwave photonics signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(20): 4479-4487.
- [14] Fang Z J, Chin K K, Qu R H, et al. Fundamentals of optical fiber sensors[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.