

预写入标尺实现光纤光栅布拉格波长精确控制

庄炜^{1,2}, 辛璟焘^{1,2}, 张旭³, 李红^{1,2}, 祝连庆^{1,2*}¹北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;²北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016;³北京信息科技大学北京市光电测试技术重点实验室, 北京 100192

摘要 为提高光纤布拉格光栅(FBG)中心波长的刻写精度,提出了一种基于预写入标尺的FBG波长控制方法,并建立了预写入标尺波长与目标波长之间的关系。预写入标尺指的是在正式刻写指定波长(λ_B)的FBG前预先刻写的弱FBG。首先,使用单个低能脉冲照射受一定预紧力作用的光纤,使之形成一个微弱但可测得反射峰的弱FBG,其反射中心波长为 λ_{Br0} ;接着撤去预紧力,测得松弛后的弱FBG的反射中心波长为 λ_{Br1} ;然后根据FBG中心波长漂移与受力大小的变化关系计算得到 λ_{Br2} ,改变预紧力使FBG的反射波长变为 λ_{Br2} ;最后用高能量脉冲完成FBG的刻写,此时,松弛后的FBG的反射中心波长应为指定波长 λ_B 。用预写入标尺法刻写了6种不同波长的FBG,FBG中心波长的刻写值与理论值的一致性较好,FBG刻写波长的误差均值为0.007 nm,误差标准差为0.029 nm。此方法实施简单,稳定可靠,能有效提高FBG中心波长的刻写精度。

关键词 光栅; 准分子激光; 预写入标尺; 波长控制

中图分类号 TN305.7; TH253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0606001

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)自1978年首次成功制备以来^[1]就成为重要的光学滤波器件,在光纤激光器、光纤通信和光纤传感等领域有着不可替代的作用。特别是在光纤传感领域,经过多年发展,光纤光栅检测的物理量已从最初的应变与温度拓展到变形、振动、电场、流速等多种物理量^[2-7]。相应地,光纤光栅的制作方法也发展出了多种^[8-9]。基于准分子激光的相位掩模版法^[8]具有对光源时空相干性要求低、刻写速度快、可靠性高等优势,已成为一种被广泛应用的FBG刻写方法。但由于相位掩模版的周期是固定的,不加以调整时只能固定刻写FBG的中心波长。为了刻写不同波长的FBG,通常需要改变光栅夹持预紧力的大小来调控刻写的FBG的中心波长,但夹持预紧力的控制精度不高,易导致中心波长的刻写精度不高。目前,FBG刻写精度在 ± 0.1 nm左右,而多波长激光器以及密集波分复

用、密集传感阵列等应用均对FBG反射中心波长的刻写精度提出了更高要求。

为解决上述问题,研究人员进行了大量研究。如:Nakagawa等^[10]在光纤一端悬吊重物,通过施加不同的张力来改变同一块掩模版的实际刻写波长;宋志强等^[11]通过标定预紧力与刻写波长的关系,利用测力计控制预紧力的大小,继而控制刻写波长,该方法的刻写精度为 ± 0.05 nm;Sun等^[12]提出了在飞秒激光直写FBG进行应力退火时通过悬吊重物来改变刻写波长的方法,该方法实现了1.181 nm/g的灵敏度系数;Dmitriev等^[13]使用悬垂重物法刻写了高反光栅阵列,刻写精度为 ± 0.05 nm。

上述方法都是通过间接测量来控制刻写波长的,会引入额外的误差源,限制了刻写精度的进一步提高。为解决此问题,本课题组提出了基于预写入标尺的光纤光栅布拉格波长的精确控制方法。该方法通过直接监测波长的变化,减小了额外误差,实现了FBG刻写波长的精确控制。本课题组基于

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-08-19; 录用日期: 2021-08-24

通信作者: *zhulianqing2021@163.com

248 nm 准分子激光 FBG 刻写系统设计、构造了 FBG 波长可以精确控制的刻写系统,并进行了相关实验,对实验结果进行了分析。

2 预写入标尺方法及相关理论推导

2.1 光纤光栅的刻写原理

基于相位掩模版的 FBG 的刻写原理如图 1 所示,紫外入射光束经过相位掩模版后发生衍射,变为多阶(0 级、±1 级、±2 级等)衍射光。

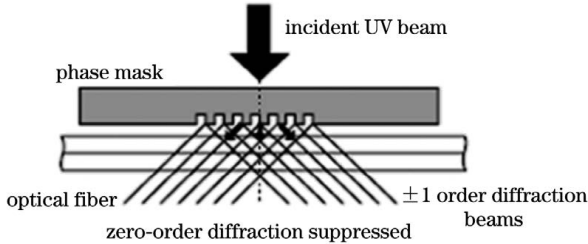


图 1 影像测量系统原理图

Fig. 1 Block diagram of image measuring system

通过优化设计相位掩模版的齿高,可以抑制 0 级衍射(一般低于 5%),从而使 ±1 级衍射光的能量最大化。两束衍射光在近场发生干涉,形成明暗相间的周期条纹,条纹周期为 Λ_{grating} ,则有

$$\Lambda_{\text{grating}} = \frac{1}{2} \Lambda_{\text{pm}}, \quad (1)$$

式中: Λ_{pm} 为相位掩模版的周期。由(1)式可知,相位掩模版的干涉周期与入射光的波长无关,仅与相位掩模版的周期 Λ_{pm} 有关。在紫外光照射下,光纤折射率随照射光强变化,明暗相间的周期条纹使得相应部分纤芯的折射率周期性变化,在光纤内形成周期性光栅结构,导致光纤内传播的光发生布拉格衍射。由布拉格条件可知光纤光栅的反射波长 λ_{Bragg} 为

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda_{\text{grating}} = n_{\text{eff}} \Lambda_{\text{pm}}, \quad (2)$$

式中: n_{eff} 为光纤的有效折射率。

2.2 基于预紧力的光栅刻写波长控制方法

相位掩模版的周期是固定的,不作调整时对应固定的 FBG 中心波长。为了刻写不同波长的 FBG,通常需要更换不同周期的掩模版,而且还需要对光纤施加一定的预拉紧力,用于对刻写 FBG 的中心波长进行微调。

使用相位掩模版刻写 FBG 的 Bragg 反射波长满足(2)式,对于同一块相位掩模版,其掩模周期 Λ_{pm} 固定不变,即相位掩模版照射到光纤上的条纹周期为 Λ_{grating} ,也不变。当光纤受到纵向拉伸力 F 时,若 F 在光纤的弹性范围内,则光纤的形变满足

$$\delta = \frac{\Delta L}{L} = -\frac{1}{kL} F, \quad (3)$$

式中: δ 为光纤的伸长率; L 为光纤受拉伸段的长度; ΔL 为光纤受拉伸段长度的变化值; k 为光纤的劲度系数。此时进行 FBG 刻写,则光纤折射率的调制周期为 Λ_{grating} ,对应的反射中心波长为 λ_{Bragg} ;刻写完成后,撤去预拉紧力 F ,则光纤长度缩短,对应的 Λ_{grating} 变为 $\Lambda'_{\text{grating}}$,即

$$\Lambda'_{\text{grating}} (1 + \delta) = \Lambda_{\text{grating}}. \quad (4)$$

由于预紧力为拉力,因此伸长率 $\delta > 0$,由此可得 Bragg 反射波长 λ_{Br} 小于该相位掩模版的理论 Bragg 反射波长 λ_{B} ,即:

$$\lambda_{\text{Br}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda'_{\text{grating}} < 2n_{\text{eff}} \Lambda_{\text{grating}} = \lambda_{\text{B}}. \quad (5)$$

因此,通过控制预紧力 F 的大小,即改变光纤的伸长率 δ ,就可以刻写任意波长 λ_{Br} 的 FBG,如(6)式所示。

$$\lambda_{\text{Br}} = \frac{n_{\text{eff}} \Lambda_{\text{pm}}}{1 + \delta}. \quad (6)$$

2.3 预写入标尺方法及相关理论推导

由于预紧力的控制精度以及一些误差因素的影响,通过控制预紧力来改变刻写波长的 FBG 刻写方法的精度不高。因此,本课题组提出了预写入标尺方法,即:跳过预紧力监测,通过直接监测波长的变化实现 FBG 刻写波长的精确控制。

首先,在正式刻写指定波长 λ_{Br} 的 FBG 前,使用单个低能量脉冲(30 mJ)照射受一定预紧力作用的光纤,使其产生一个具有反射率微弱但可测反射峰的弱 FBG,其反射中心波长为 $\lambda_{\text{Br}0}$ 。该弱 FBG 称为预写入标尺。通过光谱仪监测预写入标尺的反射峰的变化,可以准确监测预紧力的变化。接着,撤去预紧力,测得松弛后的弱 FBG 的反射中心波长为 $\lambda_{\text{Br}1}$ 。然后改变预紧力,使 FBG 反射波长变为根据 FBG 中心波长漂移与受力大小之间的关系计算得到的值 $\lambda_{\text{Br}2}$ 。最后利用高能量脉冲完成 FBG 刻写流程,松弛后即可得到反射中心波长为指定波长 λ_{Br} 的 FBG。

$\lambda_{\text{Br}2}$ 的计算推导过程如下:

设所使用的相位掩模版的相位周期为 Λ_{pm} ,则,无预紧力时,对应的刻写波长为

$$\lambda_{\text{Br}0} = n_{\text{eff}} \Lambda_{\text{pm}}. \quad (7)$$

进行制作预写入标尺前,对光纤施加微小的预紧力 F_1 ,对应的光纤伸长率为 δ_1 ,此时刻写得到的预写入标尺的反射中心波长为 $\lambda_{\text{Br}0}$ 。由(6)式可得,松弛后的 Bragg 反射波长 $\lambda_{\text{Br}1}$ 满足

$$\lambda_{Br1} = \frac{1}{(1 + \delta_1)} \lambda_{Br0} \quad (8)$$

改变预紧力为 F_2 , 对应的光纤伸长率为 δ_2 , 由 (6) 式可得预写入标尺的反射中心波长为 λ_{Br2} , 满足

$$\lambda_{Br1} = \frac{1}{(1 + \delta_2)} \lambda_{Br2} \quad (9)$$

保持预紧力为 F_2 , 使用多个高能脉冲进行正式刻写, 得到 FBG 的反射中心波长为 λ_{Br0} , 由 (6) 式可得松弛后的反射中心波长 λ_{Br} 应满足

$$\lambda_{Br} = \frac{1}{(1 + \delta_2)} \lambda_{Br0} \quad (10)$$

由 (9)、(10) 式可得

$$\lambda_{Br2} = \frac{\lambda_{Br0} \lambda_{Br1}}{\lambda_{Br}} \quad (11)$$

正式刻写得到的光栅的反射率比预写入标尺的反射率高出 30 dB 以上, 因此, 预写入标尺对正式刻写光栅反射峰的影响可以忽略。

3 刻写实验与误差分析

3.1 基于预写入标尺方法的光纤光栅刻写系统

指定波长的准分子激光器 FBG 刻写系统示意图如图 2 所示。该系统由 248 nm 脉冲发光准分子紫外激光器、紫外反射镜、扩束镜组、整形光阑、聚焦柱透镜、相位掩模版、预紧力控制装置、光谱监测系统等组成。通过调整掩模版与预紧力参数, 可以实现指定波长的 FBG 刻写。

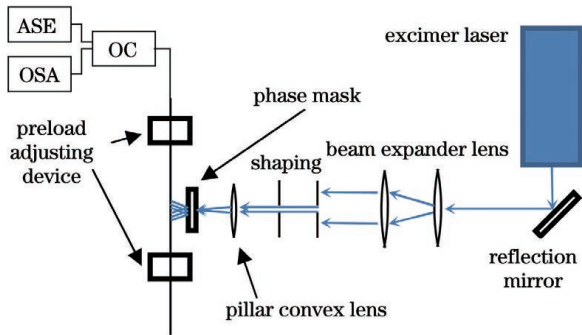


图 2 准分子激光器 FBG 刻写系统示意图

Fig. 2 Diagram of excimer laser FBG inscription system

激光由准分子激光器发出后, 先由 45° 紫外反射镜将其转折 90°, 之后经扩束镜组扩束后经过整形光阑, 此时光束形状调整为指定形状, 随后光束经过聚焦柱透镜会聚成线, 最后通过掩模版生成干涉光束, 照射在待刻写的光纤上。光纤固定在两侧的预紧力调节装置上, 该装置可以方便地对光纤的方位与预紧力进行调整。系统外围设备还包括自制的 C-band 放大自发辐射 (ASE) 宽带光源、1 × 2 光纤

耦合器 (OC, 50:50)、光开关、AQ6370D 光谱分析仪 (OSA, 光谱分辨率为 20 pm, 可用寻峰算法获得更高的波长精度)。光谱分析仪用于监测光纤光栅的实时刻写情况。

预写入标尺方法需要通过图 2 所示的预紧力调节装置对预紧力进行精密调整, 该装置的结构如图 3 所示。

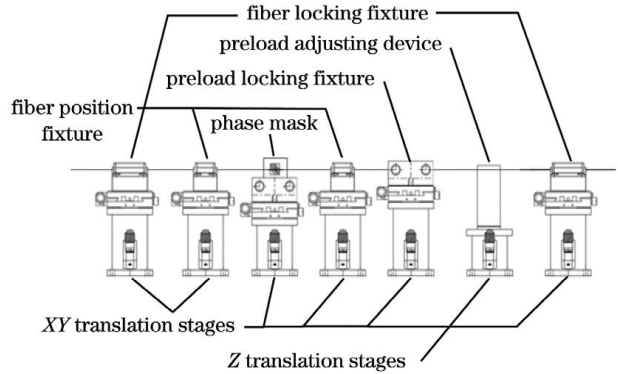


图 3 预紧力调节装置示意图

Fig. 3 Diagram of preload control installations

掩模版安装在掩模版支架上, 通过控制掩模版支架的高度可使掩模版定位在光路高度上。光纤定位夹具用于定位光纤的位置, 通过调节光纤定位夹具下方的二维移动平台, 可使光纤经过掩模玻璃基板上的掩模部分, 且与激光通过掩模形成的周期性干涉条纹垂直。光纤固定夹具用于固定光纤, 使光纤在预紧力的作用下不发生相对滑动。预紧力加载装置用于加载预紧力。如图 4 所示, 沿光纤方向观察预紧力加载装置, 其为倒置 L 型金属构件, 其与下方的升降台使用磁铁连接, 倒置 L 型金属构件倒挂在光纤上。当升降台向下移动时, 金属构件对光纤产生向下的拉力, 拉力的分量作用在光纤轴向, 称为预紧力。升降台使用微分头控制, 可对预紧力的大小实现精细控制。调整好预紧力之后, 用预紧力

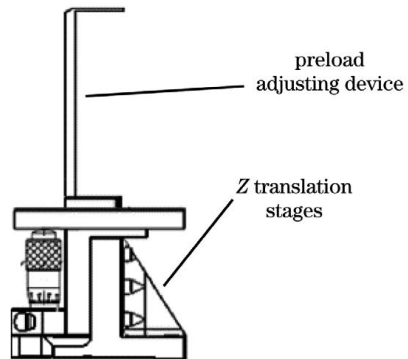


图 4 预紧力加载装置示意图

Fig. 4 Diagram of preload loading device

锁定夹具压紧光纤,确保在光纤刻写时,掩模版处所加预紧力的大小不变。

3.2 实验过程

使用掩模周期 Λ_{pm} 为 528.965 nm 的相位掩模版和经过载氢增敏的光纤进行实验,光纤的有效折射率 $n_{eff} = 1.45$,由(2)式可知其理论刻写中心波长为 1533.999 nm。对光栅加载不同大小的预紧力,要求刻写得到波长分别为 1531.000, 1531.500, 1532.000, 1532.500, 1533.000, 1533.500 nm 的光纤光栅。

具体的刻写方法如下:

1) 将光纤上待刻写部分的涂覆层进行剥除,得到一段长度为 10 mm 的裸露光纤包层,将光纤两端接入光纤刻写在线监测系统。

2) 将光纤安装至光纤定位系统上,并施加微小的预紧力,施加的预紧力能保证光纤绷直即可。

3) 控制准分子脉冲紫外光源以最小的输出能量(30 mJ)输出 1 个脉冲,在光纤上刻写一个预写入标尺。此时,使用光纤刻写在线监测系统监测 FBG 的反射谱,可以监测到一个微弱的反射峰,测得其反射中心波长为 λ_{Br0} 。

4) 将光纤从光纤定位系统中取出,并使其保持松弛状态,此时测得其反射中心波长为 λ_{Br1} 。

5) 根据(11)式计算 λ_{Br2} 。

6) 通过在线监测系统监测预写入标尺反射峰的反射中心波长,并通过控制预紧力施加装置来改变预紧力的大小,进而改变刻写反射峰的反射中心波长,将其调整至 λ_{Br2} 。

7) 控制准分子脉冲紫外光源以正常输出能量输出若干个脉冲(50 mJ, 600 个以上脉冲),对光纤进行刻写。同时,使用光纤刻写在线监测系统监测 FBG 的反射谱和透射谱,直至其满足 FBG 刻写参数要求,停止准分子脉冲紫外光源的输出。

8) 将 FBG 从光纤定位系统中取出,并保持松弛状态,检测并记录其 Bragg 反射波长等相关参数。

3.3 实验结果及误差分析

使用预写入标尺刻写方法刻写 3.2 节中要求的波长分别为 1531.000, 1531.500, 1532.000, 1532.500, 1533.000, 1533.500 nm 的光纤光栅,实验结果如表 1 所示。

实际刻写波长值与目标波长值之间的误差如图 5 所示,波长误差的平均值为 0.007 nm,波长误差的标准差为 0.029 nm。实验结果说明,预写入标

表 1 实验结果

Table 1 Experimental result

| No. | Design wavelength /nm | Inscription wavelength /nm | Wavelength error /nm |
|-----|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 1531.000 | 1531.024 | 0.024 |
| 2 | 1531.500 | 1531.541 | 0.041 |
| 3 | 1532.000 | 1531.968 | -0.032 |
| 4 | 1532.500 | 1532.486 | -0.014 |
| 5 | 1533.000 | 1532.993 | -0.007 |
| 6 | 1533.500 | 1533.533 | 0.033 |

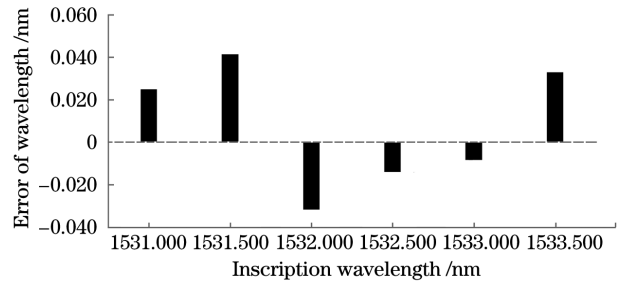


图 5 光纤刻写实验结果

Fig. 5 Experimental result of FBG inscription

尺刻写方法能有效控制刻写的光栅波长。误差来自两方面:一是控制预紧力加载装置施加预紧力时,装置上的微分头控制精度引入的误差。预紧力加载装置的移动方向与光纤方向垂直,设光纤的水平长度为 L_1 ,当控制预紧力加载装置在垂直方向上移动距离 h 时,光纤被拉伸的长度为 ΔL ,由三角函数可得, $\Delta L = \sqrt{(L_1^2 + h^2)} - L_1$,由此引起的光纤的应变会导致波长漂移 $\Delta\lambda$ 。由实验装置的几何尺寸可以推导出,当 $\Delta L = 3$ mm 时,微分头会引入约 0.005 nm 的随机误差。二是放置刻写光纤时,光纤与光路不严格垂直。设光纤与光路间的夹角为 θ ,则在光纤轴向形成的条纹周期为 $\Lambda_{axis} = \Lambda_{grating} / \cos \theta$,将其代入(1)、(2)式,计算可得在 $\theta = 0.3^\circ$ 时,由不垂直引入的误差为 0.021 nm。以上两方面共同导致了刻写波长具有一定误差。

由实验结果可知,实际刻写得到的波长值与目标波长值之间误差的标准差为 0.029 nm。此外,刻写过程还会受到激光器脉冲电路发电引发的平台振动、空气流动、光纤自身振动导致的刻写波长误差,因此,需要采取一定措施来避免这些因素引入误差,如,将激光器与光路分平台放置,用遮罩将光路整体密闭,刻写前静置等。

4 结 论

本课题组用预写入标尺方法取代传统的预紧力监测方法,通过直接监测波长的变化减小了额外误差,实现了 FBG 刻写波长的精确控制。刻写了 6 种不同波长的 FBG,其中心波长的实际刻写值与目标值具有较好的一致性,FBG 刻写中心波长的误差均值为 0.007 nm,误差标准差为 0.029 nm。所用方法实施简单,稳定可靠,能有效提高 FBG 中心波长的刻写精度。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Zhou W H, Ye Q, Ye L, et al. Distributed optical fiber *in situ* monitoring technology for a healthy temperature field in lithium ion batteries[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204002.
周炜航, 叶青, 叶蕾, 等. 锂离子电池内温度场健康状态分布式光纤原位监测技术研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204002.
- [3] Sun L Y, Liu C C, Jiang M S, et al. Fatigue crack prediction method for aluminum alloy based on fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1306003.
孙玲玉, 刘长超, 姜明顺, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的铝合金疲劳裂纹预测方法[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1306003.
- [4] Yan J, Li W, Jiang M S, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1106006.
闫洁, 李伟, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与三维重构技术[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1106006.
- [5] Li T L, Guo J X, Tan Y G, et al. Recent advances and tendency in fiber Bragg grating-based vibration sensor: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12074-12087.
- [6] Gonçalves M N, Werneck M M. Optical voltage transformer based on FBG-PZT for power quality measurement[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2699.
- [7] Allil A S, Dutra F D S, Dante A, et al. FBG-based sensor applied to flow rate measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
- [8] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [9] Li C L, Tang J G, Cheng C, et al. FBG arrays for quasi-distributed sensing: a review [J]. Photonic Sensors, 2021, 11(1): 91-108.
- [10] Nakagawa K, Takemura Y, Kunimoto R, et al. Fabrication of fiber gratings with different Bragg wavelengths using a single phase mask[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(5B): L599-L601.
- [11] Song Z Q, Qi H F, Li S J, et al. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- [12] Sun X Y, Chang Z K, Zeng L, et al. Wavelength tunable fiber Bragg gratings fabricated by stress annealing assisted femtosecond laser direct writing [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102427.
- [13] Dmitriev A A, Gribaev A I, Varzhel S V, et al. High-performance fiber Bragg gratings arrays inscription method [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 63: 102508.

Precise Control of Fiber Bragg Grating Wavelength by Preinscription Grating

Zhuang Wei^{1,2}, Xin Jingtao^{1,2}, Zhang Xu³, Li Hong^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2*}

¹Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

²Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;

³Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China

Abstract

Objective Fiber Bragg grating (FBG) has become an essential optical filter component. Higher requirements for the accuracy of FBG wavelength are demanded when dealing with applications such as multiwavelength lasers, dense wavelength division multiplexing, and dense sensor arrays. Based on this, people developed several methods to obtain an accurate FBG. For example, different weights are hung at the termination of the optical fiber to apply different tensions, thus changing the inscribed wavelength with the same phase mask, which can also be altered by hanging weight during stress annealing, or using a dynamometer to control the preload of the fiber after calibrating the relationship between different preload and the inscribed wavelength. The methods mentioned above all apply indirect measurements to control the inscribed wavelength, thus introducing an additional source of error and limiting further improvements of inscribing accuracy. In this study, we design and construct a precise FBG Bragg wavelength controlling method based on preinscription grating using a 248 nm excimer laser FBG inscribed system. Additional errors are reduced by directly monitoring the wavelength change. We demonstrate the usefulness of this method, which is simple, stable, and reliable and can effectively improve FBG center wavelength inscribing accuracy.

Methods The specific inscribing process is shown as follows:

- 1) Strip the coating layer to obtain a 10 mm long bare optical fiber and connect both ends to the optical fiber writing online monitoring system.
- 2) Install the optical fiber to the positioning system and then apply a slight preload to enable the optical fiber to straighten.
- 3) Control the excimer-pulsed ultraviolet laser in order for it to output a single pulse with the minimum output energy (30 mJ) to preinscribe the optical fiber. A preinscribed grating with a weak reflection peak can be obtained with a Bragg wavelength of λ_{Br0} .
- 4) Remove the optical fiber from the positioning system and keep it slack. Here, the measured reflection center wavelength of preinscribed grating is λ_{Br1} .
- 5) Calculate λ_{Br2} according to formula (11).
- 6) Monitor the reflection center wavelength of the preinscribed reflection peak, control the preload loading device, and change the reflection center wavelength of preinscribed grating by modifying the preload; adjust it to λ_{Br2} .
- 7) Control the excimer-pulsed ultraviolet light source to output more than 600 pulses at a standard output power. Meanwhile, use the optical fiber writing online monitoring system to monitor the FBG reflection spectrum/transmission spectrum until it meets the requirements and then stop the output of the excimer-pulsed ultraviolet light source.
- 8) Remove the FBG from the fiber positioning system and keep it in a relaxed state, detect and record its Bragg reflection wavelength and other related parameters.

Results and Discussions We designed and constructed a precise FBG inscribing system based on a 248 nm excimer laser. Six FBGs with different wavelengths have been obtained, as shown in Table 1. The error between the inscribed and the target wavelength value has been evaluated: the mean error is 0.007 nm and the standard deviation of error is 0.029 nm. The experimental results show that the preinscription grating inscribing process effectively controls the FBG wavelength. Here, the error comes from two sources: the first originates from the differential

head of the Z translation stages.

Moreover, when the differential head is used to apply a preload, its control accuracy introduces an error originating from the moving direction of the preload adjusting device, which is perpendicular to the direction of the optical fiber; when it is moved in the vertical direction, the optical fiber is stretched. The wavelength shift caused by the optical fiber strain can be deducted from the experimental device's geometric size; for example, when the optical fiber is stretched by 3 mm, the differential head will introduce a random error of ~ 0.005 nm. The second error source is because the fiber and the optical path are not strictly perpendicular; for example, if the angle between them is 0.3° , the error introduced corresponds to 0.021 nm. The nonvertical configuration leads to an inevitable error in the inscribing wavelength. The experimental results show that the standard deviation of the wavelength error between the inscribing wavelength value and the target wavelength value is 0.029 nm. The inscribing process would also be affected by the platform vibration originating from the power charging of the laser pulse circuit, airflow, and the fiber's vibration. Therefore, placing the laser and the optical path on a different platform is necessary, seal the optical path within a flow shielding box and leave the fiber to stabilize before inscribing.

Conclusions In our experiment, the preinscribing method replaces the traditional preload monitoring method. The other error is reduced by directly monitoring the wavelength change; the FBG inscribing wavelength precise controlling is realized. We inscribed six FBGs with different wavelengths; the actual inscribed value of the center wavelength is in good agreement with the target value. The mean error of the FBG center wavelength is 0.007 nm and the standard deviation of error is 0.029 nm. Thus, our method proves to be simple, stable, and reliable, and it can effectively improve FBG center wavelength writing accuracy.

Key words grating; excimer laser; preinscription; wavelength control