

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.07

基于狭缝整形的低损耗飞秒光纤光栅制备

张鹏浩, 陈爽, 武洪波

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了解决飞秒激光逐点法制备的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG)损耗较高的问题, 利用逐面法完成飞秒光纤光栅制备的实验研究。运用高斯光束传播的基本理论, 通过狭缝整形技术对聚焦的飞秒激光能量分布进行等高宽整形, 突破在光纤横截面内诱导产生圆形折射率调制的难点, 最终制备得到低损耗的飞秒光纤光栅。开展不同狭缝宽度制备FBG的光谱特性对比实验, 结果表明: 利用光斑直径为5.0 mm的飞秒激光光束刻写FBG时, 采用宽度为1.7 mm的狭缝制备得到的FBG插入损耗降低至0.15 dB, 短波损耗降低至0.5 dB, 验证了基于狭缝整形的低损耗飞秒光纤光栅制备方法的有效性。针对狭缝法制备的FBG反射率分散问题, 提出控制折射率匹配液填充量以及调整飞秒激光能量的方法, 并优化光束聚焦流程, 成功降低FBG反射率的分散度。本研究对推动飞秒光纤光栅在大容量、高链路损耗等环境中的实际应用具有重要意义。

关键词: 光纤布拉格光栅; 飞秒激光; 狭缝整形; 低损耗; 反射率

中图分类号: TB96; TH74 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2023) 06-0060-07

Fabrication of low loss femtosecond fiber Bragg gratings based on slit shaping

ZHANG Penghao, CHEN Shuang, WU Hongbo

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the problem of high loss of fiber Bragg gratings (FBGs) fabricated by femtosecond laser point by point, experimental research on the fabrication of femtosecond fiber Bragg gratings was completed using the plane-by-plane method. Using the basic theory of Gaussian beam propagation, the focused femtosecond laser energy distribution was contoured with equal height and width using slit shaping technology, breaking through the difficulty of inducing circular refractive index modulation within the fiber cross-section, and ultimately fabricating low loss femtosecond fiber gratings. Comparative experiments were conducted on the spectral characteristics of FBG fabricated with different slit widths. The results showed that when using a femtosecond laser beam with a spot diameter of 5.0 mm to write FBG, the insertion loss of the FBG prepared with a slit width of 1.7 mm was reduced to 0.15 dB, and the short-wavelength loss was reduced to 0.5 dB. This verified the effectiveness of the low loss femtosecond fiber grating fabrication method based on slit shaping. A method is proposed to control the filling amount of refractive index matching solution and adjust the femtosecond laser energy for the problem of dispersion of FBG reflectivity fabricated by the slit method, and the beam focusing process is optimized to successfully reduce the dispersion of FBG reflectivity. This study is of great significance in promoting the practical application of femtosecond fiber gratings in environments with high capacity and high chain loss.

Key words: fiber Bragg gratings; femtosecond laser; slit shaping; low loss; reflectivity

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-06-25

引用格式: 张鹏浩, 陈爽, 武洪波. 基于狭缝整形的低损耗飞秒光纤光栅制备[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 60-66.

Citation: ZHANG P H, CHEN S, WU H B. Fabrication of low loss femtosecond fiber Bragg gratings based on slit shaping[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 60-66.



0 引言

飞秒激光具有极高的峰值功率密度,可以在石英光纤中任意位置实现非线性电离,利用飞秒激光能够制备出具有杰出耐高温性能的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG)^[1],此类FBG在航空航天、核电冶金等极端环境传感领域具有广泛的研究和应用价值。相比相位掩模板技术^[2],飞秒激光直写技术灵活性更高,更适用于啁啾^[3-4]、切趾^[5-7]、相移以及定制中心波长FBG的制备^[8]。

目前,飞秒激光直写技术主要包括三种方法:逐点法、逐线法和逐面法。

逐点法的原理:在FBG刻制过程中,飞秒激光脉冲与光纤以速度 $v = \Lambda \cdot f$ 匀速相对运动(其中 Λ 为FBG的周期, f 为飞秒激光的重复频率),利用飞秒激光脉冲在纤芯诱导形成平行于光纤轴向的折射率调制^[9]。逐点法的刻写过程简单、直接,但是制备得到的FBG通常宽带损耗较大、耦合强度较低,并且容易诱发高阶模耦合。根据耦合模理论,逐点法形成的椭圆形折射率调制在光纤横截面内不对称,而且折射率调制未能覆盖整个纤芯截面,光纤内传输的光容易被解耦到高阶模式中,形成损耗^[10-11]。在实际使用中,过高的损耗将降低FBG反射峰强度,甚至出现无法正常寻峰的情况,导致FBG失效。

逐线法以垂直于光纤轴向的线代替点对光纤进行刻写。逐线法的刻写速度显著低于逐点法,但刻写时能够覆盖光纤横截面内更大的范围,减小包层模的耦合。线条纹的折射率调制区域更大、更平滑,通过合理控制线的长度和表面粗糙度,能够达到降低损耗的效果^[12]。

逐面法的原理是在光纤纤芯横截面内产生均匀的二维折射率调制平面。该方法的优点是光纤横截面内的光栅条纹宽度和高度灵活可控,同时光纤轴向的条纹长度只受聚焦物镜的数值孔径和飞秒激光中心波长的影响。通过选择合理的光栅条纹尺寸,能够在光纤横截面内实现等高宽的光栅条纹,减少高阶模耦合幅度,从而达到降低损耗的目的。逐面法由Theodosiou等人于2016年首次提出^[13],随后被应用于多种场景,例如制备聚合物光纤光栅^[14]、倾斜FBG^[15]以及基于光纤光

栅的干涉仪^[16]等。在飞秒激光聚焦光路前加入平凸透镜或者狭缝对聚焦光斑焦场能量分布进行整形,是实现逐面法的两种主要方式。基于狭缝的整形技术相比基于平凸透镜的整形技术^[17]光路更加紧凑,且狭缝的使用也有助于减少圆柱形光纤几何形状引起的散焦。但基于狭缝的整形技术对脉冲能量要求更高^[18]。

为解决飞秒激光逐点法制备的FBG损耗较高的问题,本文提出一种基于狭缝整形的低损耗飞秒光纤光栅制备方法。分析狭缝限制下高斯光束焦场的能量分布,利用狭缝整形获得等高宽焦场。采用不同宽度的狭缝制备反射率约90%,中心波长约1 550 nm的FBG,通过对比FBG显微形态以及透射光谱中的损耗特性,验证狭缝整形对折射率分布的影响以及狭缝整形对插入损耗和短波损耗的抑制作用。最后针对狭缝法制备的FBG反射率分散的问题,在控制折射率匹配液填充量的基础上,提出飞秒光束聚焦优化流程,提升FBG反射率的稳定性。

1 狭缝整形原理

基于狭缝整形的逐面法制备FBG原理图如图1所示。使用中心波长 λ 为800 nm的飞秒激光光源,在光束聚焦前的光路中插入狭缝,狭缝长度方向与光纤轴向(x 方向)一致。在光纤横截面($y-z$ 平面)内,折射率调制区域在 y 方向上的宽度和在 z 方向上的高度分别由瑞利长度与束腰半径决定,可通过调整狭缝的宽度灵活控制,在 x 方向上的长度由

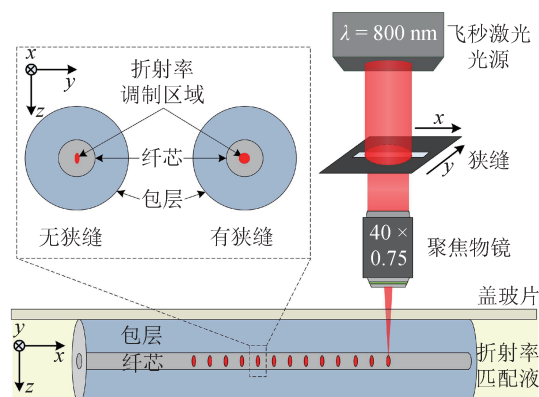


图1 基于狭缝整形的逐面法制备FBG原理图

Fig.1 Schematic diagram of FBG fabrication using a plane by plane method based on slit shaping

飞秒激光的波长和聚焦物镜的数值孔径决定。通过适当调整狭缝宽度，可以得到等高宽的圆形折射率调制区域。

为简化计算，假设高斯光束充满物镜传输，聚焦成为椭圆形高斯光束，该椭圆形光束长轴与物镜接收光直径相同。在 x 方向上焦点处，椭圆长轴的束腰半径 ω_0 和瑞利长度 Z_0 分别为

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi N_A} \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (2)$$

式中： N_A 为物镜的数值孔径。

受狭缝调制，在 y 方向上，短轴的束腰半径 ω'_0 和瑞利长度 Z'_0 有所变化

$$\omega'_0 = \frac{R_x}{R_y} \omega_0 \quad (3)$$

$$Z'_0 = \frac{\pi \omega_0'^2}{\lambda} \quad (4)$$

式中： R_x 和 R_y 分别为椭圆长轴和短轴方向的半径。聚焦后的光斑，短轴方向的束腰半径扩展 R_x/R_y 倍，同时长轴方向仍保持紧聚焦的状态，这有助于限制瑞利长度的扩大。因此，当使用椭圆高斯光束时，可以大大降低由瑞利长度与束腰之比决

定的高宽比。

经过狭缝的椭圆高斯光束在焦点附近的能量分布可表示为^[18]

$$I_e(x, y, z) = \frac{1}{[1 + z^2/Z_0^2]^{1/2}} \cdot \frac{1}{[1 + z^2/Z_0'^2]^{1/2}} \cdot \exp\left[-2\frac{x^2}{\omega_0^2(1 + z^2/Z_0^2)}\right] \cdot \exp\left[-2\frac{y^2}{\omega_0'^2(1 + z^2/Z_0'^2)}\right] \quad (5)$$

为了获得等高宽分布的焦场能量分布，仿真计算不同狭缝宽度下的焦场能量分布。设定入射激光直径为5.0 mm，计算狭缝宽度分别为5.0、3.0、2.0、1.7、1.5、1.0 mm时的焦场能量分布，结果如图2所示。以狭缝宽度5.0 mm时的焦场能量分布模拟无狭缝时的焦场能量分布情况，此时狭缝宽度与入射飞秒激光直径相等，可忽略狭缝对光束的整形效果，能量分布如图2(a)所示，焦场能量分布具有较大的高宽比。随着狭缝宽度逐渐减小，焦场能量分布的高宽比也逐渐减小，当狭缝宽度为1.7 mm时，光斑能量分布近似为圆形，高宽比接近1，如图2(d)所示，达到了理想的整形效果。进一步减小狭缝宽度至1.5 mm以及1.0 mm，光斑能量分布被过度整形，再次呈椭圆形，高宽比小于1。

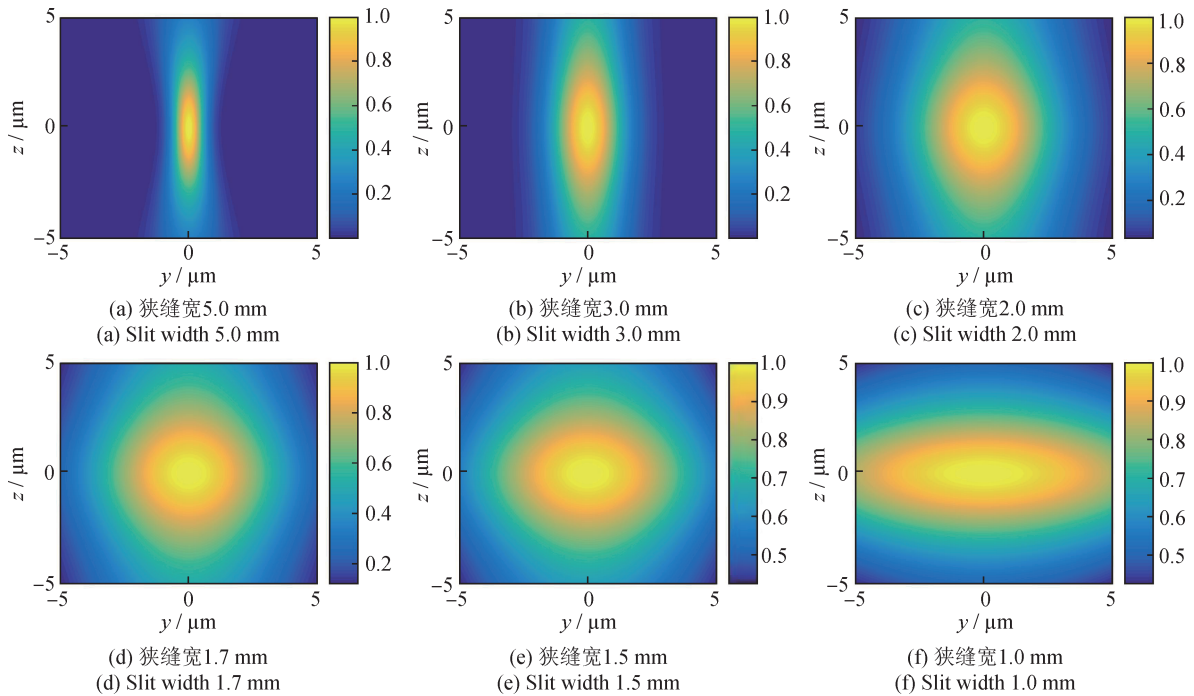


图2 不同狭缝宽度时的焦场能量分布

Fig.2 Energy distribution of focal field under different slit widths

2 FBG形态和光谱特性

采用Spectra-Physics生产的掺钛蓝宝石飞秒激光再生放大系统作为飞秒激光光源，其脉冲宽度为120 fs，重复频率为1 kHz，最大单脉冲能量约为1 mJ，光斑直径约为5.0 mm；聚焦物镜的放大倍数为40倍，数值孔径为0.75；光纤为Corning公司生产的SMF-28e+标准石英单模光纤，纤芯直径为8.2 μm ，包层直径为125 μm ，涂覆层为丙烯酸酯；刻制3 mm长的2阶FBG。

采用无狭缝、狭缝宽度1.7 mm和狭缝宽度1.0 mm三种不同方式刻写FBG，沿飞秒激光入射方向、垂直于飞秒激光入射方向分别观察光纤光

栅结构，并测试对应FBG的透射光谱，结果如图3所示。采用无狭缝方式刻写FBG时，光栅结构呈椭圆形，插入损耗和短波损耗分别为0.9 dB和4.01 dB。采用宽度为1.7 mm的狭缝刻写FBG时，沿飞秒激光入射方向和垂直于飞秒激光入射方向观察到的光栅条纹尺寸接近，表明折射率调制区域被整形为接近圆形，此时插入损耗和短波损耗均达到最小值，分别为0.5 dB和0.15 dB。采用宽度为1.0 mm的狭缝刻写FBG时，沿飞秒激光入射方向观察到的光栅条纹显著宽于垂直于飞秒激光入射方向观察到的光栅条纹，表明出现了过度整形，折射率调制区域再次接近椭圆形，此时插入损耗和短波损耗分别为1.03 dB和0.22 dB。

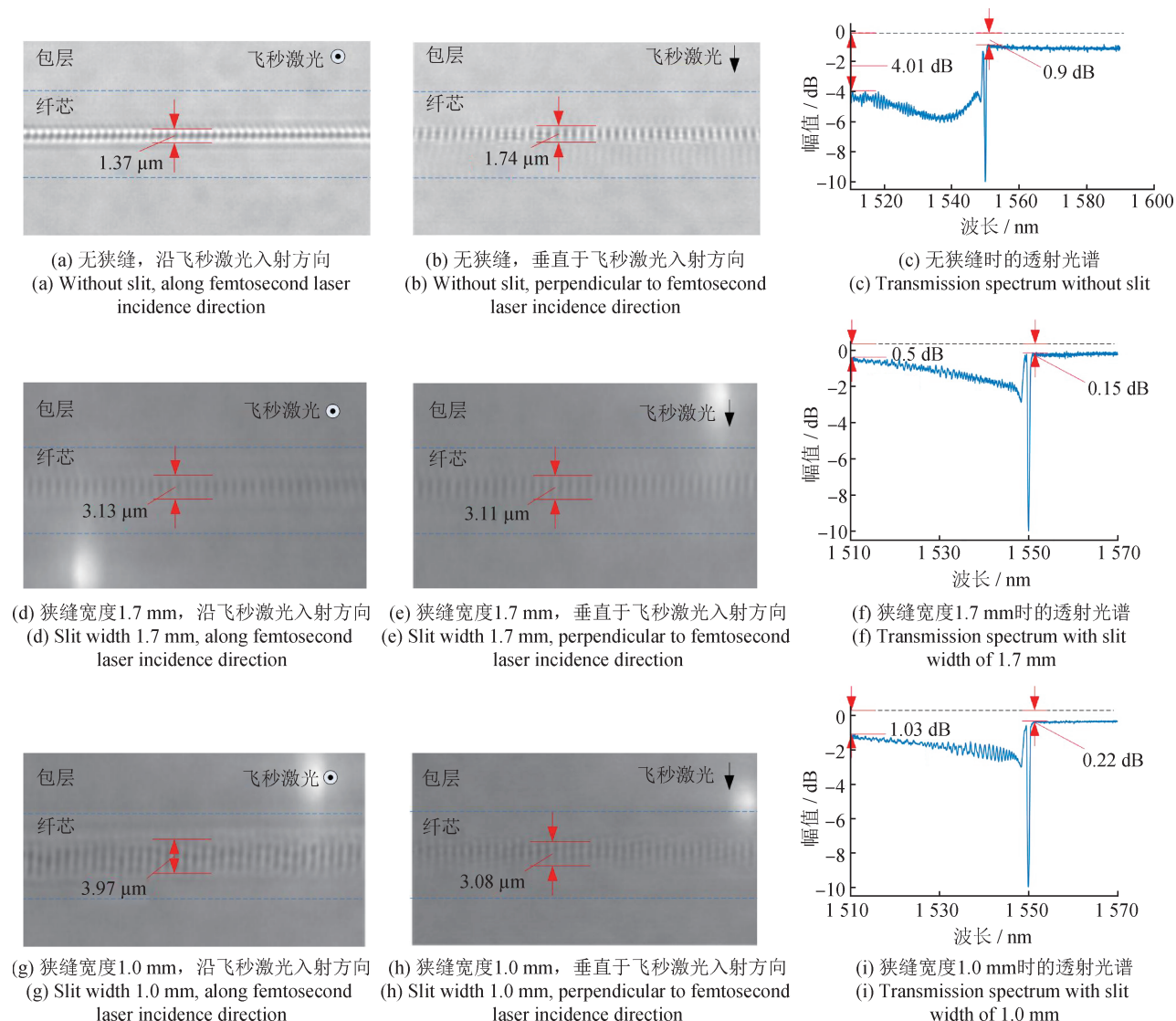


图3 FBG的显微图像和透射光谱

Fig.3 Microscopic images and transmission spectra of FBG

统计不同狭缝尺寸时的光栅条纹尺寸,结果如表1所示,当采用宽度为1.7 mm的狭缝刻写FBG时,条纹高宽比最接近1。光纤光栅短波损耗的主要来源是米氏散射^[11],即一种球体颗粒对光的散射。逐面法在逐点法基础上,将光栅条纹由椭圆形展宽为圆平面,降低了表面散射,同时更大的折射率调制范围,降低了光纤内传输的纤芯基模耦合到高阶模的效率,高阶模激发被抑制,从而使损耗减小。实验结果表明:对于光斑直径约5.0 mm的飞秒激光,采用宽度为1.7 mm的狭缝刻写FBG,可获得等高宽的折射率调制区域,以及最小的短波损耗和插入损耗。

表1 光栅条纹尺寸
Tab.1 Size of grating fringes

狭缝情况	条纹高度/ μm	条纹宽度/ μm	高宽比
无狭缝	1.74	1.37	1.27
狭缝宽度1.7 mm	3.11	3.13	0.99
狭缝宽度1.0 mm	3.08	3.97	0.77

3 反射率分散的原因及解决方法

利用基于狭缝整形的逐面法制备20支FBG的反射率分布如图4所示,反射率分布区域覆盖4%~95%,并且未呈现显著的统计规律,这表明利用基于狭缝整形的逐面法制备的FBG存在反射率分散的问题,显著降低了FBG的合格率。

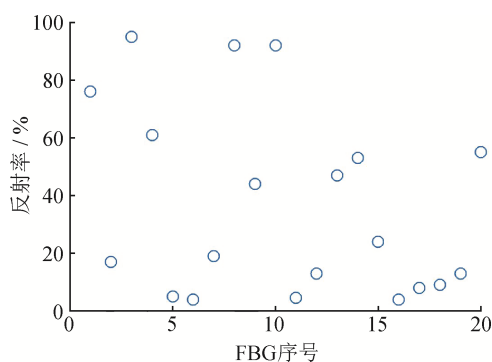


图4 狭缝引起的反射率分散现象

Fig.4 Reflectance dispersion caused by slits

经排查,反射率分散现象是由于折射率匹配液填充过量造成的。在制备FBG的过程中,需要填充折射率匹配液以消除光纤表面的柱透镜效应。

待测光纤置于载玻片上,两侧平行放置准直光纤,然后在待刻写区域涂折射率匹配液,再覆盖盖玻片。如果填充过量的匹配液,盖玻片会在匹配液表面张力作用下轻微悬浮,使飞秒激光在经过匹配液和盖玻片时受到扰动,影响光束聚焦的重复性。通过减少匹配液填充量,可使盖玻片紧密地压在准直光纤上,提高光束聚焦的重复性。控制折射率匹配液填充量原理图如图5所示。

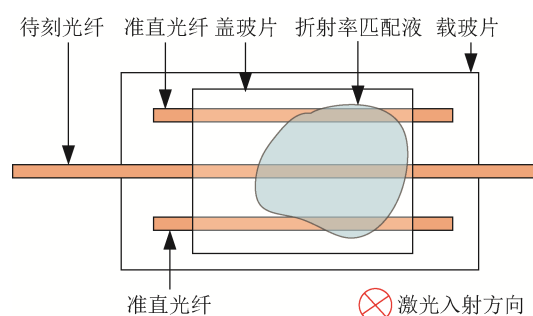


图5 控制折射率匹配液填充量原理图

Fig.5 Schematic diagram of controlling the filling amount of refractive index matching oil

在控制折射率匹配液填充量的基础上,采用2.1、2.7、3.2 μJ 三种不同能量的激光分别制备20支FBG,统计反射率测量结果如图6所示。当激光能量为2.1 μJ 时,制备得到的FBG反射率为40%~60%;当激光能量为2.7 μJ 时,制备得到的FBG反射率为70%~90%;当激光能量为3.2 μJ 时,制备得到的FBG反射率为90%~95%。实验结果表明:通过控制折射率匹配液填充量,能够较好地解决反射率分散的问题。

插入狭缝和调整激光能量会引起焦点位置偏

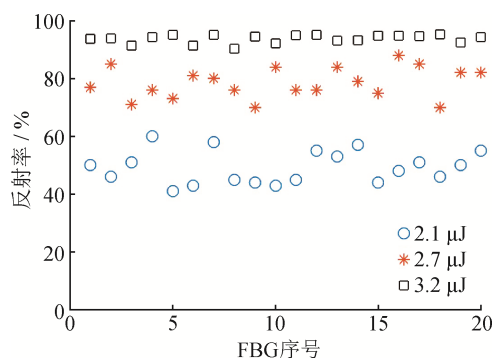


图6 不同飞秒激光能量制备FBG的反射率

Fig.6 Reflectivity of FBG fabricated with different femtosecond laser energies

移,每次操作结束后均需要重新对焦。为了保证光栅条纹始终处于纤芯正中,归纳光束聚焦优化流程,如图7所示。根据实际需求设定光栅性能指标,调整狭缝宽度和激光能量;然后刻制FBG,观察并调整光栅条纹位置,使其居中;之后测试光栅反射率是否符合要求,如果不符合,优先执行步骤①调整激光能量,如果调整后反射率仍不符合要求,再执行步骤②调整狭缝宽度,每次调整结束后均需要确认光栅条纹是否处于纤芯正中。该光束聚焦优化流程可满足刻写不同参数FBG的需求,也为后续更复杂的光路改造提供了重要支撑。

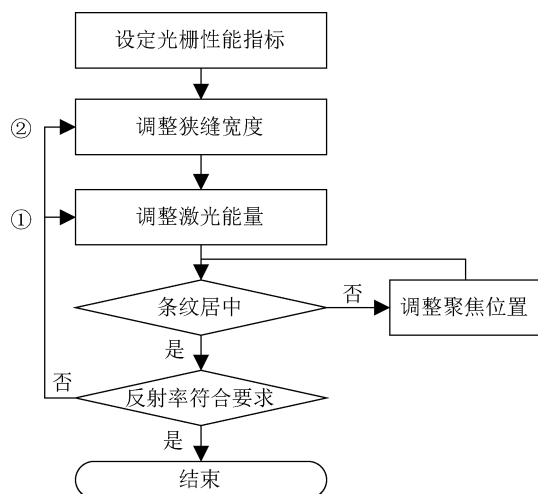


图7 光束聚焦优化流程

Fig.7 Beam focusing optimization process

4 结论

提出了一种基于狭缝整形的低损耗飞秒光纤光栅制备方法,推导了狭缝限制下高斯光束焦场的能量分布公式,并对等高宽焦场的狭缝条件进行了分析,获得了光斑能量分布接近理想圆形的狭缝条件。开展了显微图像和透射光谱测量实验,结果表明利用光斑直径为5.0 mm的飞秒激光光束刻写FBG时,采用宽度为1.7 mm的狭缝制备得到的FBG插入损耗降低至0.15 dB,短波损耗降低至0.5 dB。通过控制折射率匹配液填充量,减小匹配液对聚焦位置的扰动,并提出光束聚焦优化流程,解决了逐面法制备FBG反射率分散的问题。本文的研究成果为提高飞秒光纤光栅传感系统的传感器容量提供了有力支撑,为提升高链路损耗环境

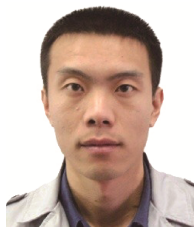
中FBG应用的可靠性提供了技术借鉴,对推进光纤传感系统在航空航天、核电等工业领域中的应用具有重要意义。

参考文献

- [1] 张欣颖,陈爽.石英套管封装光纤光栅温度传感器[J].计测技术,2018,38(6):11-14.
ZHANG X Y, CHEN S. Quartz sleeve encapsulates fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(6): 11-14. (in Chinese)
- [2] MIHAILOV S, SMELSER C, GROBNIC D, et al. Bragg gratings written in All-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 94-100.
- [3] PAN X P, GUO Q, WU Y D, et al. Femtosecond laser inscribed chirped fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2021, 46(9): 2059-2061.
- [4] 李昊,王蒙,武柏屹,等.基于飞秒激光制备的啁啾倾斜布拉格光纤光栅[J].中国激光,2023,43(5).
LI H, WANG M, WU B Y, et al. Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings with femtosecond laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 43(5). (in Chinese)
- [5] ANDREAS I, KYRIACOS K. Femtosecond laser inscribed fiber Bragg gratings based on precise spatial apodization[J]. Optics Letters, 2023, 48(7): 1826-1829.
- [6] GUO Q, ZHENG H M, WANG B, et al. Femtosecond laser fabricated apodized fiber Bragg gratings based on energy regulation[J]. Photonics, 2021, 8(4): 110-118.
- [7] 张鹏浩,陈爽,武洪波.倾斜切趾光纤光栅的理论与实验研究[J].计测技术,2022,42(5):119-124.
ZHANG P H, CHEN S, WU H B. Theoretical and experimental study on the oblique apodized fiber Bragg gratings[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(5): 119-124. (in Chinese)
- [8] 熊贤伟,陈胜平,朱宏田,等.飞秒激光直写高反射率中红外光纤布拉格光栅[J].中国激光,2022,49(1).
XIONG X W, CHEN S P, ZHU H T, et al. High reflectivity mid-infrared fiber Bragg grating by femtosecond laser direct inscription method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1).
- [9] THOMAS J, VOIGTLAENDER C, BECKER R G. Femtosecond pulse written fiber gratings: a new avenue to integrated fiber technology[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(6): 709-723.
- [10] WILLIAMS R J, JOVANOVIC N, MARSHALL G D, et

- al. Optimizing the net reflectivity of point-by-point fiber bragg gratings: the role of scattering loss [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13451–13456.
- [11] ÅSLUND M L, JOVANOVIĆ N, GROOTHOF N, et al. Optical loss mechanisms in femtosecond laserwritten point-by-point fibre Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14248–13254.
- [12] ZHOU K, DUBOV M, MOU C, et al. Line-by-line fiber bragg grating made by femtosecond laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16): 1190–1192.
- [13] THEODOSIOU A, LACRAZ A, POLIS M, et al. Modified fs-laser inscribed FBG array for rapid mode shape capture of free-free vibrating beams [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1509–1512.
- [14] THEODOSIOU A, LACRAZ A, STASSIS A, et al. Plane-by-plane femtosecond laser inscription method for single-peak Bragg gratings in multimode CYTOP polymer optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(24): 5404–5410.
- [15] IOANNOU A, THEODOSIOU A, CAUCHETEUR C, et al. Direct writing of plane-by-plane tilted fiber Bragg gratings using a femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5198–5201.
- [16] THEODOSIOU A, IOANNOU A, KALLI K. All-in-fiber cladding interferometric and Bragg grating components made via plane-by-plane femtosecond laser inscription [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4864–4871.
- [17] LU P, MIHAILOV S J, DING H, et al. Plane-by-plane inscription of grating structures in optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 926–931.
- [18] PABLO R V, DAVID P A, LUIS R C, et al. Slit beam shaping technique for femtosecond laser inscription of enhanced plane-by-plane FBGs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4526–4532.
- [19] 阿曼·亚里夫, 波奇·耶赫. 光子学: 现代通信光电子学 [M]. 陈鹤鸣, 施伟平, 汪静丽, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- AMNON Y, POCHI Y. *Photonics: optical electronics in modern communications* [M]. Translated by CHEN H M, SHI W P, WANG J L, et al. Beijing: Electronic Industry Press, 2014. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 张鹏浩 (1990—), 男, 博士, 毕业于北京航空航天大学测试计量技术及仪器专业, 主要从事飞秒激光制备耐高温光纤光栅技术以及极端环境下光纤传感技术研究。2023年7月在中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所完成博士后研究工作。