

基于 CO₂ 激光器的长周期光栅制作及实验

樊文韬¹, 林雅坤², 郭子裕², 张会新²

(1. 湖北久之洋红外系统股份有限公司, 武汉 430200;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 长周期光纤光栅 (LPFG) 作为一种重要的无源光器件, 以其独特的性能和优势被广泛应用于光纤通信与传感领域; 近年来发表了许多不同的 LPFG 制造方法, 但产品可靠性依旧是需要解决的关键问题; 提出用 CO₂ 激光熔融拉伸法制备长周期光纤光栅, 改善了在 LPFG 制备中各种因素影响导致刻写失败的问题, 该方法采用 CO₂ 激光器对光纤进行加热软化, 在步进电机的恒定拉力下拉锥, 重复在据上一锥形中心一个光栅周期的位置处加热拉伸, 得到在波长为 1 539 nm 处出现最大衰减峰, 峰值大于 15 dB 的长周期光纤光栅, 提高了 LPFG 的制备成功率及一致性; 并对产品的可靠性进行验证, 测试其温度、轴向应力的敏感特性; 该研究在光纤激光系统及其应用的光学器件方面有较大应用潜力。

关键词: CO₂ 熔融拉伸成锥法; 单模光纤; 长周期光纤光栅; 光纤光学; 光栅特性

Fabrication and Experiment of Long Period Grating Based on CO₂ Laser

FAN Wentao¹, LIN Yakun², GUO Ziyu², ZHANG Huixin²

(1. Hubei Jiuzhiyang Infrared System Co., Ltd., Wuhan 430200, China; 2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: As an important passive optical device, long-period fiber grating (LPFG) is widely used in the field of optical fiber communication and sensing due to its unique performance and advantages. In recent years, many different LPFG manufacturing methods have been published, but product reliability is still a key problem to be solved. A CO₂ laser melt stretching method is proposed to prepare LPFGs, which improves the problem of the writing failure caused by various factors in the preparation of LPFG. This method uses CO₂ laser to heat and soften the fiber, pull down the taper under the constant tension of the stepping motor, and repeatedly heat and stretch at the position of one grating period at the center of the previous taper, and obtain the maximum attenuation peak at the wavelength of 1 539 nm, the LPFG with peak value is greater than 15 dB, which improves the success rate and consistency of the LPFG preparation. The reliability of the product is verified, and its sensitivity to the temperature and axial stress is tested. This research has a great application value in optical fiber laser system and its applied optical devices.

Keywords: CO₂ fused taper method; single mode fiber; LPFG; fiber optics; grating characteristics

0 引言

长周期光纤光栅 (LPFG, long period fiber grating) 已经被深入研究了数十年^[1]。在用做传感器方面, 长周期光纤光栅 (LPFG) 的光栅周期相较于布拉格光纤光栅更长, 同向传输的光纤内芯模和包层模需达到相位匹配条件, 这就使得长周期光纤光栅 (LPFG) 的衰减峰峰值等对外界环境的改变更为敏锐, 因此 LPFG 在温度、应变、弯曲灵敏度等方面有更好的表现^[2]。1978 年, Hill 等使用氢离子激光器 (Hydrogen laser) 在掺锗光纤 (Ge-doped optical fibers) 中刻写了第一段光纤光栅, 打开了光纤的新大门^[3]。到 1989 年, Meltz 等人利用紫外线激光器从侧面写入光纤光栅获得成功, 使得光纤光栅的刻写效率有了极大的提

升^[4]。1996 年, Vengsarkar 等人利用相位掩模写入法制备了 LPFG^[5]。1998 年, Davis 等第一次采用 CO₂ 激光器进行刻写, 成功制备 LPFG^[6]。同年, Bhatia 团队对 LPFG 的温度、应变、环境折射率等传感参数进行了研究^[7]。1997 年, Erdogan 对模式耦合的理论进行研究, 分析布拉格光栅与长周期光栅的形成机制与频谱特征, 建立了 LPFG 的理论基础^[8]。近年来国内外研究者对 LPFG 制造方法及理论进行了大量的研究和优化^[9], 但在制备长周期光纤光栅时, 最需考虑的即制备方式的稳定性及制备成本的控制, 大多数 LPFG 包含 20~80 个周期, 需要 5~20 分钟的加热或应力保持。保持产品一致性是一项严峻的挑战, 因为在长时间加热期间灯丝或电极状态会发生变化。

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-03-16。

作者简介: 樊文韬(1996-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 张会新(1980-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。

引用格式: 樊文韬, 林雅坤, 郭子裕, 等. 基于 CO₂ 激光器的长周期光栅制作及实验[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 216-223.

为改进产品一致性问题, 本文研究发现 CO₂ 激光器能够作为一种更好的 LPFG 制造热源, 因为它具有清洁, 低维护和长期一致性的优点。CO₂ 激光器可以用于所有类型的 LPFG 的制备中, 光纤能够较好地吸收 CO₂ 激光的能量, 通过机械应力的作用导致折射率发生相应的变化, 加热会使光纤内芯与包层的松弛性发生不同的变化, 在机械应力的作用下, 光纤内芯折射率降低, 而包层折射率增加^[10-11]。

本文对熔接机 LZM-110 制作拉伸成锥形长周期光纤光栅的工艺流程进行了深入研究, 同时也对长周期光纤光栅的理论进行了探讨, 搭建了 LPFG 的制作及实验平台, 并设计相关程序, 制备长周期光纤光栅, 测试分析了所制备的 LPFG 的各项传感特性。

1 长周期光纤光栅的耦合理论

1.1 局部耦合理论

在 LPFG 中, 光纤的包层区域的锥形区域是周期性, 并且锥形区域和非锥形区域内的有效折射率变化为周期性变化, 采用局部耦合模式对波导的模式特性进行分析^[12-13]。计算 LPFG 的内芯和同向包层之间的耦合, 可以得到相位不匹配的具体值, 其计算公式可表示为:

$$\Delta\varphi = \int_0^z \left[\beta_{cl}(z) - \beta_{co}(z) + \frac{2N\pi}{\Lambda} \right] dz \quad (1)$$

其中: $\beta_{co}(z)$ 和 $\beta_{cl}(z)$ 分别代表光纤内芯传播常数和光纤包层传播常数, 且都是与光纤纵轴 z 有关的周期函数, 这两个函数的周期均为光栅周期 Λ , 当满足相位匹配条件时光纤会发生谐振耦合。因此在任何随机起始点 z_0 的单个周期内均满足相应的相位匹配, 使得 $\Delta\varphi = \varphi(z_0 + \Lambda) - \varphi(z_0) = 0$ 。因此 LPFG 的相位匹配条件可表示为:

$$\lambda = \int_{z_0}^{z_0+\Lambda} [n_{\text{eff,co}}(z) - n_{\text{eff,cl}}(z)] dz \quad (2)$$

其中: $n_{\text{eff,co}}(z)$ 和 $n_{\text{eff,cl}}(z)$ 分别表示光纤内芯和光纤包层的有效折射率。综上所述, 由局域模式耦合理论可以得出以下结论:

光栅的共振波长最终取决于光栅的周期与光纤的有效折射率。因内芯和包层之间为同向耦合, 其传播常数的符号相反。为了使得光纤光栅在通信波段 1.3 μm 或者 1.5 μm 波段使用, 控制 LPFG 的光栅周期设置在 100~700 μm 的范围内^[14-15]。

1.2 温度局部耦合理论

LPFG 有热光效应, 温度的改变使得光纤有效折射率、结构等发生变化, 学习发现 LPFG 的衰减波长的中心位置与光纤光栅周期、光纤内芯和包层的有效折光率等因素有关^[16]。LPFG 的温度敏感程度与包层模数相关, 随着包层模数的增加, 其感应灵敏度也随之提高。可以将长周期光纤光栅 (LPFG) 的温度敏感系数表示为:

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{kL \sin(2kL)}{I} \left(\frac{dI}{dT} - \frac{I}{\lambda_{\text{res}}} \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} \right) = -\frac{kL \sin(2kL)}{I} \left[\left(\zeta_{\text{co}} \frac{\partial I}{\partial n_{\text{co}}} + \zeta_{\text{cl}} \frac{\partial I}{\partial n_{\text{cl}}} \right) + \left(\frac{\partial I}{\partial \lambda_{\text{res}}} - \frac{I}{\lambda_{\text{res}}} \right) \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} \right] \quad (3)$$

其中: I 是以半径为 a 的区域内, 光纤内芯模式 LP_{01} 的模场 ψ_{01} 与光纤包层模式 LP_{0m} 的模场 ψ_{0m} 的重叠积分; L 为光纤光栅的光栅长度; ζ_{co} 为纤内芯热光系数, ζ_{cl} 为光纤包层热光系数, k 为光纤内芯交叉耦合系数, 由内芯的折射率调制产生, 其 I 和 k 可以用以下公式来表达:

$$I = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^a \psi_{01} \psi_{0m} r dr d\varphi}{\left(\int_0^{2\pi} \int_0^a \psi_{01} \psi_{01} r dr d\varphi \right)^{1/2} \left(\int_0^{2\pi} \int_0^a \psi_{0m} \psi_{0m} r dr d\varphi \right)^{1/2}} \quad (4)$$

$$k = \frac{\pi \Delta n_{\text{co}} I}{\lambda} \quad (5)$$

其中: 为光纤内芯折射率调制。可以由式 (3) 得知, 长周期光纤光栅的损耗峰幅值的温度灵敏度与交叉耦合系数和光栅长度、纤内芯热光系数 ζ_{co} 、纤包层热光系数 ζ_{cl} 、谐振波长的温度灵敏度 $d\lambda_{\text{res}}/dT$ 等参数相关, 在这些因素中, 交叉耦合系数 k 和光栅长度 L 的乘积对温度灵敏度影响最大。在实际应用中, 应对 LPFG 的光栅长度和内芯折射率合理设计, 使光栅刻写时交叉耦合系数 k 和光栅长度 L 的乘积的数值尽量接近于 $\pi/4$ 的奇数倍, 让其损耗峰幅值对温度有最大的灵敏度。

在制备符合温度敏感性能要求的 LPFG 时, 应首先考虑到波长要求, 选择合适的光纤类型, 再制定合适的光栅长度及内芯折射率。

1.3 轴向应力局部耦合理论

在受轴向应力作用时, 光纤内芯与包层的局部耦合效应随作用力的改变而改变。一般地, 光栅的相位匹配条件随光栅的轴向应变而变化, 将其对轴向应变微分, 可以得到轴向应变对谐振波长的影响^[17]。

从 LPFG 的相位匹配条件出发, 对式 (2) 等号左右取微分, 从而得到:

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\varepsilon} = \left(\frac{dn_{\text{eff,co}}(z)}{d\varepsilon} - \frac{dn_{\text{eff,cl}}(z)}{d\varepsilon} \right) \Lambda + [n_{\text{eff,co}}(z) - n_{\text{eff,cl}}(z)] \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \quad (6)$$

当轴向应力作用于光纤, 内芯和包层的有效折射率会随着各自的弹光系数变化。引入光纤的模式色散、波导色散, 轴向应变对谐振波长的影响可以用以下公式表示:

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\varepsilon} = \lambda_{\text{res}} \cdot \gamma^m \cdot (1 + \Gamma_{\text{strain}}^m) \quad (7)$$

其中: γ 为光纤的波导色散, Γ_{strain}^m 为谐振波长的应变灵敏系数, 可以用以下的公式表示为:

$$\Gamma_{\text{strain}}^m = \frac{\eta_{\text{co}} n_{\text{eff,co}}(z) - \eta_{\text{cl}} n_{\text{eff,cl}}(z)}{n_{\text{eff,co}}(z) - n_{\text{eff,cl}}(z)} \quad (8)$$

LPFG 的轴向应力敏感特性的大小和符号, 取决于其波导色散 γ 和谐振波长的应变灵敏系数 Γ_{strain}^m 。波导色散 γ 的值与符号与包层阶数 m 和长周期光纤光栅周期 Λ 密切相关, 波导色散 γ 会随光纤光栅周期 Λ 的增大而增加, 同时 LPFG 的轴向应力灵敏度将更高^[18]。

2 长周期光纤光栅制备

前文介绍了 LPFG 的发展历史和制造工艺的演变, 同时, 本文还对长周期光纤光栅的局部模式耦合进行了理论分析, 得出了不同的光栅周期对其传输频谱的影响程度, 并对光栅周期进行了初步范围的设置。在以上研究的基础上, 本文搭建 LPFG 制作的平台, 制作长周期光纤光栅。但对制作平台的主熔接机还是存在诸多疑问, 因此在制作之前还需对熔接机进行研究。

2.1 熔接机的结构示意图及工作原理

市场上有许多不同的方法和不同的熔接器可用于加热和制作光纤, 当涉及在生产线上应用此方法进行长周期光栅制作时, 必须考虑长时间工作过程中的熔接机参数是否稳定, 能否长时间工作而不失真。目前已经用于纤维融合过程中的热源接头主要有 4 种类型: 氢氧燃烧火焰型, 电弧放电型, 灯丝放电型以及 CO_2 激光束吸收型^[19]。Fujikura 和 AFL 实验室经过 10 多年的研究和测试, 提出 CO_2 激光加热的熔接机可以提供始终稳定的操作, 而且在制作过程中不会产生含金属氧化物颗粒的污染物, 且由于设备中没有电极而几乎不需要对其中的细小固件进行维护; 而且 CO_2 激光加热的熔接机具有精确和可调节的加热区域, 并通过吸收 CO_2 激光能量显示均匀加热。 CO_2 激光熔接机 (LZM-110) 的光路如图 1 所示。其中的柱面透镜 (浅蓝色) 是可选的, 其用途为减少沿光线轴的加热长度, 镜头可由操作者拆卸^[20]。

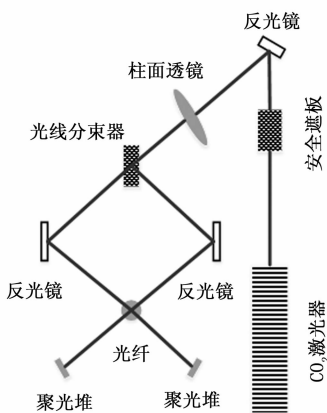


图 1 光纤熔接机 LZM-110 光路图

CO_2 激光器的激光光束经实时反馈系统稳定, 经过安全遮板, 后通过反光镜进入光纤。光束路径可通过安装在机械可调固定装置上的 3 个反光镜进行调节, 然后在第一个反光镜后用光线分束器将光束分成两个路径, 在两个相反方向上加热光纤。光路中的聚光堆不仅能够作为光能转储器, 也可用作光束功率、位置和直径测量的传感器。通过对不使用可选镜头的设计进行测试实验时发现, 如果在峰值功率的 13.5% 处测量, 光纤位置处的光束点约为 4.8 mm。由于光束具有高斯功率分布, 因此 4.8 mm 光斑

尺寸仅是标称值。光纤的实际加热长度取决于熔接机的总激光功率以及光纤在加热过程中的参数设计, 例如所需的温度水平, 加热光纤的亮度和光纤直径。然而对于一些特殊应用, 可以由操作者将具有合适聚焦长度的可选圆柱形或球形硒化锌 (ZnSe) 透镜安装到透镜架上, 以实现所需的光纤加热区域。例如为了制造周期 (间距) 小于 1 mm 的 LPFG, 就需要在光束路径中安装圆柱形 ZnSe 透镜^[21-22]。

图 2 展示了在加热期间拍摄两个光纤图像。图像 (a) 是在标准拼接过程中, 激光器和光纤之间的 CO_2 光束中在没有 ZnSe 透镜的情况下加热光纤的图示, 其沿光纤的标称光束宽度约为 4.8 mm; 图像 (b) 是安装了焦距为 10.5 英寸的圆柱形 ZnSe 透镜后加热光纤的图示, 其沿光纤的标称光束宽度约为 1.5 mm, 发现沿着光纤的亮度长度减小到 1/3, 因为使用该透镜, 沿光纤的理论光束宽度约为 1.52 mm。可以制造具有 300 μm 间距的 LPFG, 根据 CO_2 光束的高斯功率分布计算, 可得玻璃软化的有效区域仅约 250 μm 宽^[23]。

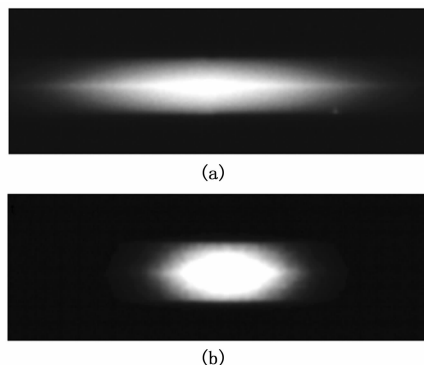


图 2 使用 CO_2 激光器在 SMF 熔接中拍摄的熔接图像

在实验中, 如图 3 所示, 采用 LZM-110 通过周期性地逐渐拉伸光纤来记录 LPFG。与传统的熔接机相比, 除了 ZL 和 ZR 电机外, LZM-110 还配有 SWEEP 电机, 可以移动由左右光纤支架沿光纤轴固定的光纤, 最大移动范围为 ± 18 mm, 精度 0.01 μm , 这是因为两个光纤夹持器放置在可由 SWEEP 电机驱动的平台, 由 SWEEP 电机进行精准位置控制。LZM-110 商用熔接机最初设计用于拼接各种类型的特殊光纤, 但 LZM-110 没有用于周期性地逐渐拉伸光纤的现有程序。本文对熔接机进行了二次开发, 建立一个新的程序, 周期性地逐渐拉伸光纤来刻录高质量的 LPFG。这样的程序可以保存在熔接机的程序存储器中, 并可以移植到任何用于 LPFG 制作的 LZM-110 系列熔接机上。

2.2 光纤光栅制作平台搭建

通过对熔接机的学习和了解, 本文初步搭建了光纤光栅制作平台, 制作光纤光栅制作平台如图 4 所示, 图中主要由 3 个部分构成: 宽带光源 (BBS), LZM-110 光纤熔接

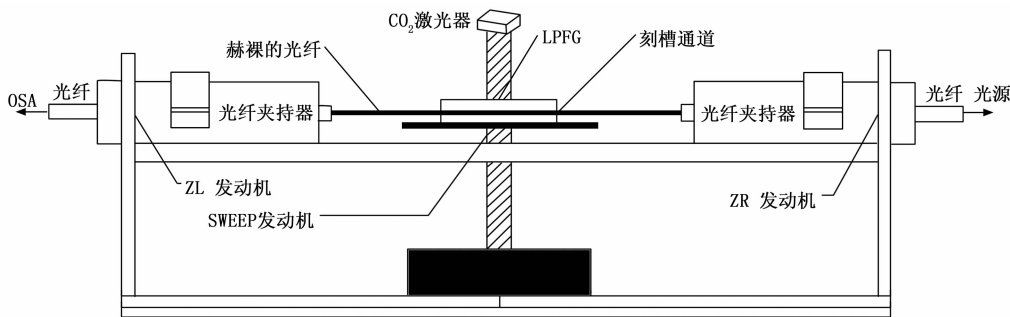


图 3 LZM-110 光纤熔接机示意图

机(带左右步进电机)和光谱仪(AQ6374C)。其中宽带光源中的白光经过整个制作系统,最后汇入光谱仪中,对光纤光栅的制作过程的透射谱进行监测和记录。

不同类型的实验对宽带光源的要求不同,在本文所搭建的光栅制作平台中,BBS作为输出光源,需要满足宽的光谱范围、好的输出频谱平坦度和尽量高的输出功率。而一般光源的输出频谱越宽,其输出频谱的平坦度也会相对的越差。因此在宽带光源的选择上,通过对几大光源厂商的产品进行了对比,最后选择了 RealLight 公司的 RL-HL 光纤卤钨灯,因为其优化的光学设计实现了低功耗高光输出而且输出稳定性达 0.2%RMS,在保证稳定度的情况下其波长覆盖了 VIS-NIR (360~2 500 nm),确保了在整个实验过程中光源的稳定性和实时监测的有效性。

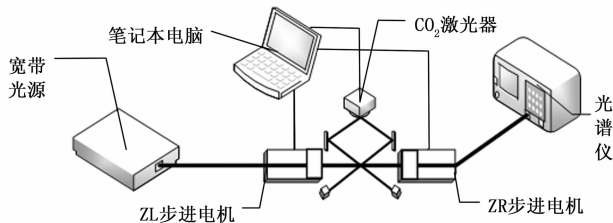


图 4 长周期光纤光栅 (LPFG) 制作平台示意图

在选择显示透射谱的光谱仪时,由于 LPFG 的透射谱的衰减峰值和对应于谐振峰对应的波长范围变化很大,而在应力和温度试验中,衰减峰值波长变化非常微小,仅为几 pm。所以既需要光谱仪的可测范围足够监测还需要光谱仪的灵敏度和精度足够大,本文选了横河公司的 AQ6374C 光谱仪,这一款光谱仪是市场上唯一涵盖了可见光波长和光通信波长的光谱仪,它的波长范围宽为 350~1 750 nm,是一般的光谱仪的两倍以上,并且它的最大采样分辨率为 2 pm,还具有可高达 100 000 个波长点的采样能力,可在单次扫描过程中精准评估和分析更广泛的波长范围。AQ6374 还有一项改进是通过优化光路设计来减少在测量期间高阶衍射光的影响。因此 AQ6374 足以测量光纤光栅的透射谱规律。

LZM-110 的步进电机的移动范围有限,无法大范围的移动进行拉伸成锥,而长周期光纤光栅需要对光纤进行 20

~50 次的重复拉伸成锥,光纤位置的摆放和步进电机的起始位置的设置都至关重要。LZM-110 自带的夹板对光纤的拉力足够大,因此不需要再对光纤施加重物保证光纤的永久绷直状态,但是步进电机的马达具有可变性,在实验前需要保证两步进电机在同一水平线上,才能保证拉伸成锥的可行性。而在步进电机的起始位置设置上,对其进行了程序设置,保证其在拉伸成锥前在可移动范围的最右端,然后在拉伸成锥过程中按程序进行重复向左移动。经过仪器的对比筛选和实验平台的搭建后,实验平台的放置如图 5 所示。

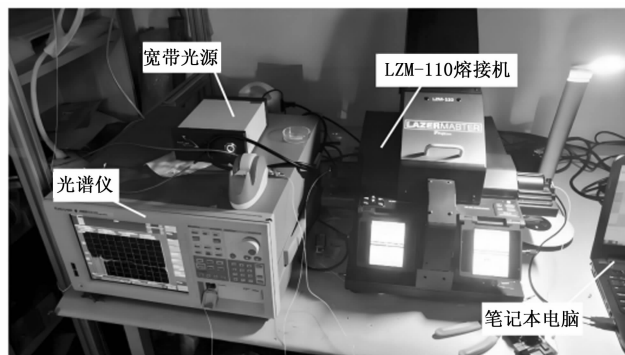


图 5 长周期光纤光栅制作平台安放图

2.3 CO₂ 熔接机程序的设计和光栅的制作

在实验过程中,CO₂ 熔接机中的激光器功率的设置和激光器照射光纤的时间无法通过理论研究进行仿真,LZM-110 熔接机的激光器功率范围为 0~30 W,如果设置的功率过大或者照射时间过长的话,光纤会因过分软化而在拉伸成锥过程中被拉断,而如果设置的功率过小或者照射时间过短,则光纤无法在正常的拉力情况下成锥或成锥不明显,因此功率的设置决定了拉伸成锥的锥度和透射谱的好坏。通过相关文献的学习和大量的测试实验^[24-26],最后确定了激光器的工作功率为 6~8 W,照射时间为 3~5 s,在这个范围内制作的长周期光纤光栅锥的深度可以达到 80~110 μm,满足了实验需要的深度。

程序的编写要基于对称锥的制作过程设计,在设计方案中,先将两根带单模跳线的 SMF 光纤小心地从纤维的中间部分除去聚合物涂层,并在逐渐变细的过程之前用异丙

醇清洁。然后将其相互熔接在一起，并将卤素灯和光谱仪分别用两端的跳线分别接通，保证在拉伸成锥过程中对光纤光栅透射特性的监测。在完成前期的准备工作后，又分三步制作光栅（如图 6 所示）。

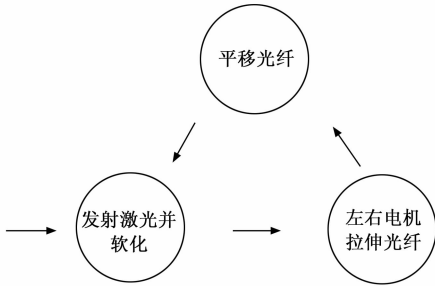


图 6 光纤制作程序流程图

第一步设置 CO₂ 激光器的功率为 6 W，照射时间为 3.5 s，使以能够充分软化被照射的位置；第二步在 3.5 s 后停止激光器照射，将 ZL 步进电机和 ZR 步进电机分别向左右两端以 0.01 mm/s 的速度拉伸 1.5 s，使被照射的光纤部分在强大的拉力下成一定的锥（锥长 0.03 mm，锥深 95 μm）；第三步，将 ZL 步进电机和 ZR 步进电机同时向左侧移动相同的距离（500 mm），再重复以上 3 个步骤 20~50 次，并根据第二章所得的波长和周期的对应关系，观察光谱仪上对应波长的透射谱的衰减峰变化，在衰减峰到达 15 dB 时即可完成长周期光纤光栅的拉伸成锥实验。其程序设计如图 7 所示。

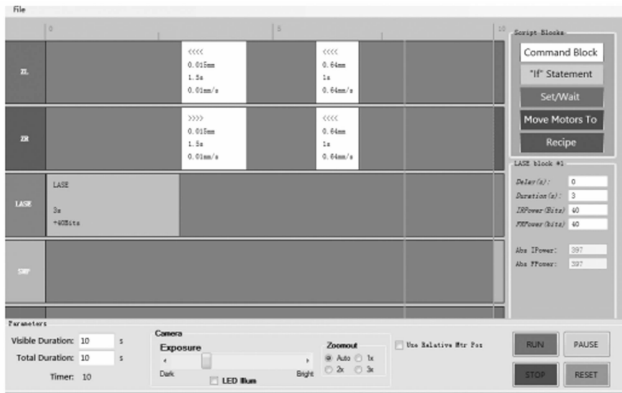


图 7 LPFG 制作程序示意图

通过上述制备方案，得到了 LPFG 成品，对其进行显微镜成像，可以得到其光栅结构如图 8 所示，经过程序自带扫描软件，得知其光栅区域深度为 110 μm，栅区长度为 30 μm，软件扫描结果如图 9 所示。

实验得到的拉伸成锥长周期光纤光栅（栅距为 640 μm）的透射光谱如图 10 所示。通过光谱仪可以看出在波长为 1 539 nm 处出现了最大衰减峰，峰值为 -18.03 dB。从熔接机中取出实验成品，可以通过肉眼清楚的观测到光纤光栅，然后通过电子显微镜可以看到其光栅效果。

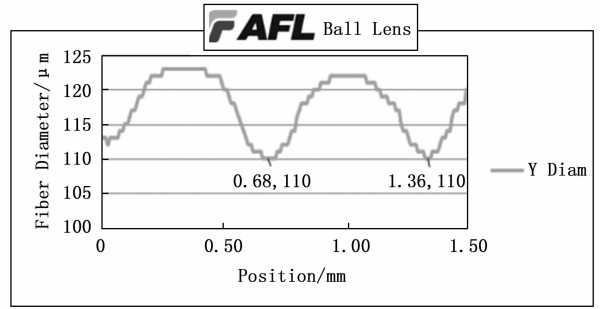


图 8 长周期光纤光栅结构图

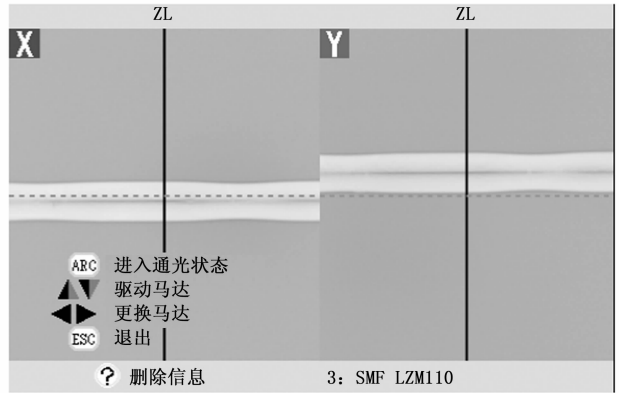


图 9 程序扫描后的图像处理

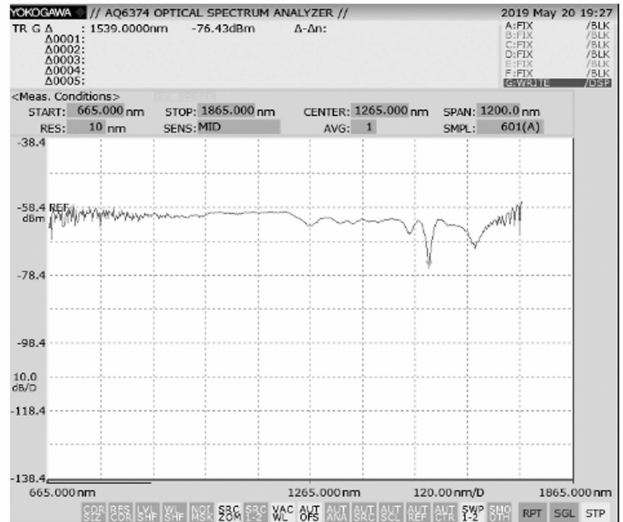


图 10 640 μm 光纤光栅的透射谱

3 长周期光纤光栅传感实验

上一章优化了 CO₂ 激光器拉伸成锥制作 LPFG 的制备工艺，搭建了制备平台，通过实验与学习优化各项参数，并成功在单模光纤上拉伸成 LPFG。本章对长周期光纤光栅的传感机制进行较为详尽的分析，并对其进行了温度、应力等方面的传感特性测试^[27-29]。

3.1 长周期光纤光栅的温度传感特性

在对 LPFG 的温度传感特性进行分析实验中, 本文利用数控恒温台对 LPFG 结构进行加热, 并将 LPFG 处于拉直状态并将两端用固定胶带将其固定, 光纤一端用跳线连接宽带光源, 另一端用跳线连接光谱仪 (OSA) 用来监测和记录光纤光栅的透射谱的变化。

搭建好测量平台后, 记录常温状态下的透射谱的数据, 然后打开恒温控制台, 将温度设置为 50 °C 对 LPFG 进行加热, 等温度稳定在 50 °C 时且透射谱稳定后, 将其透射谱数据进行记录, 此后每上升 25 °C 均对透射谱数据进行记录, 直到 300 °C。由于恒温控制台的温度控制的原理是先升温再稳定在温度附近, 不断通过实时温度进行反馈调节进行温度稳定, 而稳定温度的过程大概需要耗费 5 分钟, 完全能够确保 LPFG 能够在温度改变后充分受热, 而且其周围的温度也能够完全稳定在一个确定的值, 保证了实验的精确性。通过实验得到, LPFG 的透射谱衰减峰峰值随温度升高而增大, 如图 11 所示。

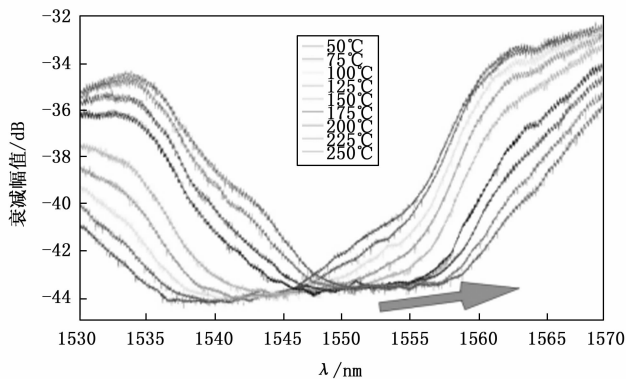


图 11 LPFG 光纤光栅透射谱随温度变化影响

从图 11 中可以看出, 当外界环境温度升高时, 长周期光纤光栅的透射光谱衰减峰峰值将会向长波方向漂移, 几乎每一个峰发生漂移的幅度基本一致, 对衰减峰的峰值进行分析, 波长值随温度变化的关系变化情况如表 1 所示。

表 1 LPFG 受温度影响衰减峰数据

温度变化 T/°C	透射光谱衰减峰值波长 λ/nm
50	1 537.310 7
75	1 539.768 0
100	1 542.263 9
125	1 544.786 9
150	1 546.306 8
175	1 547.765 6
200	1 550.068 4
225	1 551.345 1
250	1 553.169 1

从表 1 的数据可以看出, 透射谱衰减峰的随温度的变化, 中心波长在 1 537.310 7 ~1 553.169 1 nm 之间移动,

移动范围为 15.858 4 nm, 对该组数据进行线性拟合, 拟合后的透射谱峰值与温度的关系为:

$$\lambda = 0.0778T + 1534.2$$

对长周期光纤光栅的温度传感特性进行拟合后得到的透射谱衰减峰峰值的中心波长随温度变化情况如图 12 所示。

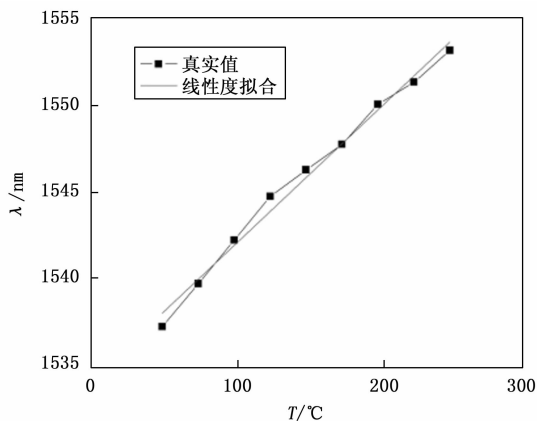


图 12 中心衰减波长随温度变化拟合图

从衰减峰峰值随温度变化关系图 12 可以看出, 这种拉伸成锥式长周期光纤光栅的对于温度的灵敏度为 77.8 pm/°C。

3.2 长周期光纤光栅的轴向应力传感特性

在长周期光纤光栅的轴向应力进行传感特性的实验研究中, 采用 LZM-110 对长周期光纤光栅结构进行拉伸成锥, 因为其对光纤的固定是其他平台无法媲美的, 而且其拉伸精度可以达到 0.01 mm, 将光纤光栅用固定夹夹住后处于拉直状态, 然后用跳线将光栅的一端连接宽带光源, 再用另一根跳线将另一端连接光谱仪 (OSA) 监测和记录光纤光栅的透射谱的变化。

搭建好测量平台后, 记录未受力状态下的透射谱的数据, 然后进行程序编写, LZM-110 允许其步进电机最大移动位置为 1.5 cm, 所以对程序的编写需保证其测量位置的前提下同时保证测量精度, 所以程序设计如图 13 所示。

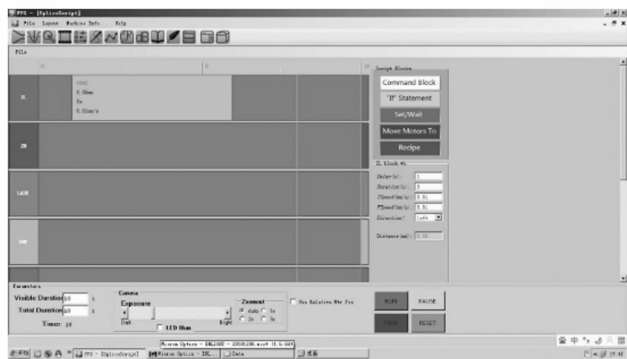


图 13 应力程序设计图

设计好程序后运行程序, 每拉伸一次记录一次光谱, 直到达到步进电机最远位置, 拉伸成锥式长周期光纤光栅

的透射谱随拉伸长度变化而变化。

通过分析发现长周期光纤光栅的峰值几乎没有发生漂移, 通过对其轴向应力耦合理论的研究, 长周期光纤光栅对轴向应力的响应是 pm 级的, 为了得到准确的透射谱, 将图在衰减处放大十倍后得到了如图 14 所示的图像, 在图 14 中, 可以大致看到其波形的变化。

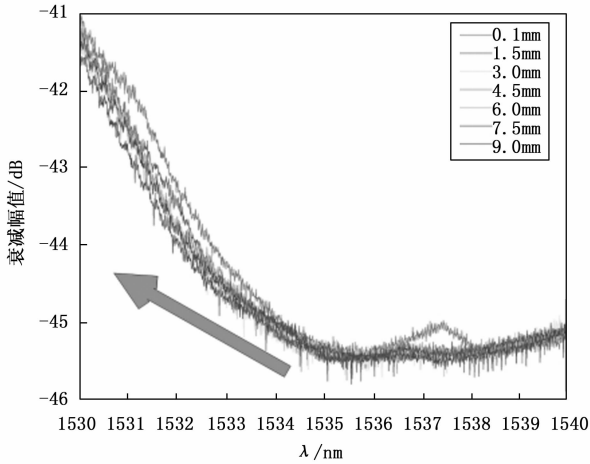


图 14 放大后的 LPFG 轴向应力透射谱

从图 14 中, 可以看出当长周期光纤光栅受到拉力后, 长周期光纤光栅的透射谱衰减峰峰值将会向短波方向漂移, 因为漂移量过小, 这里不选择其他谐振峰, 只选择衰减峰的峰值进行分析, 得到了其波长值随轴向应力变化的关系变化情况如表 2 所示。

表 2 LPFG 受轴向应力影响衰减峰数据

轴向应力 N/mm	透射光谱衰减峰值波长 λ/nm
0	1 535.632 4
1.5	1 535.530 7
3	1 535.449 1
4.5	1 535.369
6	1 535.257 6
7.5	1 535.109 4
9	1 534.986 6

对长周期光纤光栅的轴向应力传感特性进行拟合后得到的透射谱衰减峰峰值的中心波长随轴向应力变化情况如图 15 所示。

从衰减峰峰值随轴向应力变化关系图可以看出, 这种锥式长周期光纤光栅的对于轴向应力的灵敏度为 $-7.08 \text{ pm}/10 \mu\text{m}$ 。

4 结束语

在理论与实验探索的基础上, 对 LPFG 的制备工艺进行了改良, 利用 LZM-110 熔接机搭建了 LPFG 的制备平台, 设计出了一套拉伸成锥的程序, 在单模光纤中拉伸出具有良好传感响应的 LPFG, 其在波长为 1539 nm 处出现了最大衰减峰, 峰值为 -18.03 dB 。并对 LPFG 的温度、应力传感

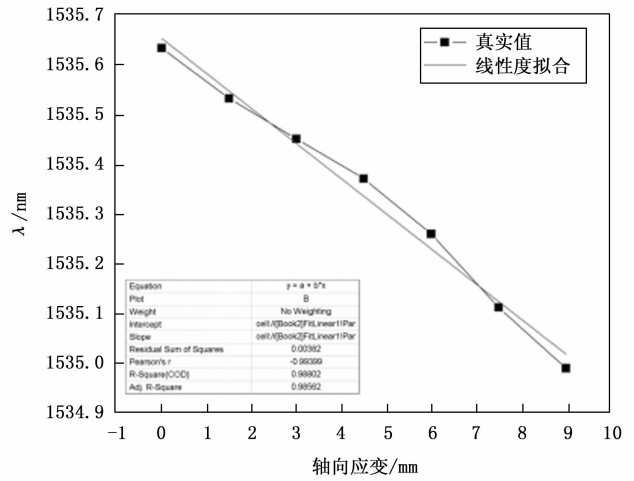


图 15 中心衰减波长随轴向应力变化拟合图

特性进行了深入研究, 搭建了相关实验平台进行测试分析, 得到其温度的灵敏度为 $77.8 \text{ pm}/\text{C}$, 轴向应力的灵敏度为 $-7.08 \text{ pm}/10 \mu\text{m}$ 。这种长周期光纤光栅的制作方式相较于传统制作方式有了极大改善, 提升了 LPFG 的制备效率, 制作的长周期光纤光栅具有良好的传感特性。下一步对该方法所制备 LPFG 的谐振峰特性、横向负载特性等传感特性进行深入的探讨, 尽快实现其更多方向的实际应用。

参考文献:

- [1] 姜明顺. 长周期光纤光栅理论及传感技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [2] 苗银萍, 刘 波, 赵启大. 不同包层直径的倾斜光纤光栅折射率传感特性 [J]. 光学学报, 2008 (11): 2072.
- [3] KAWASAKI B S, HILL K O, JOHNSON D C, et al. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers [J]. Optics Letters, 1978, 3 (2): 66-68.
- [4] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. Optics Letters, 1989, 14 (15): 823-825.
- [5] LEMAIRE P J, VENGSARKAR A M, REED W A, et al. Thermally enhanced ultraviolet photosensitivity in GeO_2 and P_2O_5 doped optical fibers [J]. APL: Organic Electronics and Photonics, 1995, 66 (16): 2034.
- [6] DAVIS D D, GAYLORD T K, GLYTSIS E N, et al. Long-period fiber grating fabrication with focused CO_2 laser pulses [J]. Electronics Letters, 1998 (3): 34.
- [7] MARTEN D V, VIKRAM B, TIFFANIE D A. Photoinduced grating-based optical fiber sensors for structural analysis and control [J]. Engineering Structures, 1998, 20 (3): 205-210.
- [8] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15 (8): 1277-1294.
- [9] YIN G, TANG J, LIAO C, et al. Automatic arc discharge technol-

- ogy for inscribing long period fiber gratings [J]. *Applied Optics*, 2016, 55 (14): 3873.
- [10] ZHENG W X. Fabrication of long period fiber gratings with CO₂ laser fusion splicers [C] //2016 Optoelectronics Global Conference (OGC), IEEE, 2016; 1-4.
- [11] 朱涛, 饶云江, 莫秋菊. 高频 CO₂ 激光脉冲写入的超长周期光纤光栅 [J]. *光子学报*, 2005, 34 (11): 99-102.
- [12] 齐跃峰, 毕卫红. 一种基于结构性改变的光子晶体光纤光栅理论研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31 (1): 0106003.
- [13] LIU Z Y, LIU Y Q, MOU C B, et al. CO₂ laser-written long-period fiber grating with a high diffractive order cladding mode near the turning point [J]. *Applied Optics*, 2018, 57 (17): 4756.
- [14] KERBAGE C, SUMETSKY M, EGGLETON B J. Polarisation tuning by micro-fluidic motion in air-silica microstructured optical fibre [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38 (18): 1015-1017.
- [15] 范弘建, 张伟刚, 颜爱东, 等. 非均匀超长周期光纤光栅的频谱分析 [J]. *中国激光*, 2010, 37 (6): 1547-1552.
- [16] LI X L, ZHANG W G, RUAN J, et al. Temperature- and strain-insensitive torsion sensor based on phase-shifted ultra-long-period grating [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48 (4): 235-236.
- [17] 赵春柳. 基于光子晶体光纤长周期光栅的传感器研究 [J]. *光电子·激光*, 2011, 22 (1): 9-12.
- [18] 杨蕊竹. 长周期光纤光栅的特性及传感应用的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- [19] TIAN X, LI H, LIU L, et al. Ultra-broadband highly efficient mode converter at 1 μ m fabricated by a line-focused CO₂ laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17 (12): 10-13.
- [20] 刘卫亮. 基于 CO₂ 激光器写制的结构调制型 LPFG 研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [21] LIU Y Q, CHIANG K S. CO₂ laser writing of long-period fiber gratings in optical fibers under tension [J]. *Optics Letters*, 2008, 33 (17): 1933-1935.
- [22] WANG Y P, LIAO C Y, ZHONG X Y, et al. Long Period Fiber Gratings Written in Photonic Crystal Fibers by Use of CO₂ Laser [J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3 (3): 193.
- [23] WANG Y P, LIAO C R, ZHONG X Y, et al. Long period fiber gratings written in photonic crystal fibers by use of CO₂ laser [J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3 (3): 193-201.
- [24] LEE H W, CHIANG K S. CO₂ laser writing of long-period fiber grating in photonic crystal fiber under tension [J]. *Optics express*, 2009, 17 (6): 4533-4539.
- [25] WANG P, GAYLORD T K. Dissimilar-fiber long-period fiber gratings: concept and demonstration [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (4): 1142.
- [26] HU Q H, TIAN X, ZHAO X F, et al. Fabrication of cascaded wideband LPFGs by CO₂ laser and Raman suppression in a 5 kW one-stage MOPA fiber laser [J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 150: 107984.
- [27] 罗涛, 顾铮先. 光子晶体光纤光栅在生物和化学传感器领域研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46 (11): 34-40.
- [28] IGNACIO, DEL, VILLAR, et al. Optimization of sensitivity in Long Period Fiber Gratings with overlay deposition [J]. *Optics Express*, 2005, 13: 56-69.
- [29] 刘俭辉. 宽带光纤放大器及可调谐掺铒光纤激光器的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [30] 宋晓茹, 任怡悦, 高嵩, 等. 移动机器人路径规划综述 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27 (4): 1-5.
- [31] KE D, LIU X Y, ZHANG B. Variable step length A* algorithm for path planning of mobile robot [C] // 2017 29th Chinese Control and Decision Conference, Chongqing; IEEE, 2017: 973-977.
- [32] JING X R, YANG X J. Application and improvement of heuristic function in A* algorithm [C] // 2018 37th Chinese Control Conference. Wuhan; IEEE, 2018: 483-486.
- [33] 李世国, 苏卫华, 郭鹏飞. 基于改进 A* 算法的无人搜救全局路径规划研究 [J]. *医疗卫生装备*, 2020, 41 (12): 16-20.
- [34] 槐创锋, 郭龙, 贾雪艳, 等. 改进 A* 算法与动态窗口法的机器人动态路径规划 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57 (8): 244-248.
- [35] 田华亭, 李涛, 秦颖. 基于 A* 改进算法的四向移动机器人路径搜索研究 [J]. *控制与决策*, 2017, 32 (6): 1007-1012.
- [36] 张红梅, 李明龙, 杨乐. 基于改进 A* 算法的移动机器人安全路径规划 [J]. *计算机仿真*, 2018, 35 (4): 319-324.
- [37] 赵晓, 王铮, 黄程侃. 基于改进 A* 算法的移动机器人路径规划 [J]. *机器人*, 2018, 40 (6): 903-910.
- [38] 张敬寒, 陶兆胜, 彭澎. 基于扩大搜索邻域 A* 算法的平滑路径规划 [J]. *长春理工大学学报 (自然科学版)*, 2018, 41 (6): 124-127.
- [39] 张帅, 李学仁, 张鹏, 等. 基于改进 A* 算法的无人机航迹规划 [J]. *飞行力学*, 2016, 34 (3): 39-43.
- [40] MARIO K, CARMADI M. Humanoid robot path planning and rerouting using A-star search algorithm [C] // IEEE International Conference on Signals and Systems, Bandung, Indonesia; IEEE, 2019: 110-115.
- [41] MD A, MD O F. Finding shortest path for road network using Dijkstra's algorithm [J]. *Bangladesh Journal of Multidisciplinary Scientific Research*, 2019, 1 (2): 41-45.
- [42] 杨奇峰, 曲道奎, 徐方. 基于障碍物运动预测的移动机器人路径规划 [J]. *计算机工程与设计*, 2021, 42 (1): 182-188.
- [43] 胡中华, 许昕, 陈中. 无人机三维航迹非均匀三次 B 样条平滑算法 [J]. *控制工程*, 2020, 27 (7): 1259-1266.