

基于相位掩模板的拉丝塔在线制作 光纤布拉格光栅方法及装置研究

余 华 何 伟 郭会勇 李小甫 冯 博 喻 玄

(武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要 拉丝塔在线制作光纤布拉格光栅(FBG)可以在单根光纤上制作无焊点串接的 FBG 阵列,有利于构建大规模的传感网络。尝试用相位掩模方法在拉丝塔上在线制作 FBG,使用这种方法可以精确地控制所制作 FBG 的布拉格波长。针对相位掩模制作 FBG 的特点以及拉丝塔在线制作 FBG 的要求,研制了一套拉丝塔在线制作 FBG 的装置,使用此装置在拉丝塔上进行了实验,在线制作出由 164 个无焊点串接的 FBG 构成的 FBG 阵列。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;相位掩模;拉丝塔;光栅阵列

中图分类号 TN253; TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0505001

Study of Fiber Bragg Grating Fabrication Online on Draw Tower via Phase Mask Method and Equipment Manufacturing

Yu Hua He Wei Guo Huiyong Li Xiaofu Feng Bo Yu Xuan

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract Fiber Bragg grating (FBG) fabrication on a draw tower can form a one-dimensional array of FBGs on a single fiber without welding spot between gratings, and is beneficial to build a massive sensor network. Phase mask method is employed to fabricate FBG online on a draw tower, by which we can precisely control the Bragg wavelength of FBG. A set of device is developed according to the characteristics of inscribing FBG by using phase mask method and the requirements of writing FBG on a draw tower. An array of 164 FBGs is produced on a single fiber by using this device.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; phase mask; draw tower; grating array

OCIS codes 060.3735; 060.2280; 230.1950; 350.2770

1 引 言

随着物联网技术的迅速发展,作为物联网的关键领域之一,传感网络面临着越来越紧迫的发展需求。光纤光栅是一种对多参量敏感的传感元件,可以通过波分复用技术在一根光纤上串接多个光纤光栅进行分布式测量^[1~3],因此,光纤光栅是构建大规模传感网络的理想传感器。然而,串接的光纤光栅传感器存在焊点多、损耗大以及机械强度差的缺点,不利于进行长距离大规模的组网。多光纤光栅串接的容量决定光纤布拉格光栅(FBG)传感网络的规

模^[4,5],而多光纤光栅串接的损耗和光纤机械强度是急需解决的难题。拉丝塔在线制作光纤光栅可以实现光栅无焊点串接,同时避免了传统制作光纤光栅的剥涂覆层过程,从而使得光栅处光纤的机械强度明显提高^[6],另外拉丝塔在线制作光纤光栅具有更高的生产效率。

拉丝塔在线制作光纤光栅,最早由 Dong 等^[7]报道,他们采用单脉冲全息干涉法实现在光敏光纤控制过程中动态在线写入光纤光栅。之后 Askins 等^[8]改进了上述制作方法,在线写入不同布拉格波长的光纤

收稿日期: 2012-12-06; 收到修改稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61290311)和中央高校基本科研业务费专项资金(125209012)资助课题。

作者简介: 余 华(1988—),男,硕士研究生,主要从事拉丝塔光栅制作方面的研究。E-mail: 576952536hua@163.com

导师简介: 何 伟(1958—),男,研究员,主要从事光纤光栅与光纤传感方面的研究。E-mail: weihe@whut.edu.cn

光栅。最近的十多年,德国的 Institute of Photonic Technology (IPHT)和 Fibre Bragg Grating Sensors (FBGS) Technologies GmbH 的研究人员致力于拉丝塔光栅在线制作,并已注册了商标 DTG[®],且已有产品面市^[9];他们在拉丝塔光栅在线写入中使用了 Talbot 干涉装置^[10]。这种 Talbot 干涉装置将一束光分成有一定夹角的两束光,然后用两块反射镜分别进行反射,使其相交产生干涉,从而在光纤中写入光栅。这种装置实际上为分光路干涉法,但相比于普通使用半反半透镜的分光路干涉法,这种 Talbot 干涉装置的结构比较紧凑,稳定性好,还可以通过旋转两块反射镜的角度来改变写入光栅的布拉格波长。

基于相位掩模板的光纤光栅制作方法是目前应用得最多、最成熟的方法。这种方法对光源的相干性要求不高,光学系统比较简单,易于操控,因此系统稳定可靠、重复性好,适合光纤光栅的工业化生产。在拉丝塔上采用相位掩模板方法在线制作光纤光栅最大优点是可以精确地控制光栅布拉格波长,尤其在制作全同光栅阵列方面优势明显。而分光路干涉法通过控制两个反射镜的角度来改变光栅布拉格波长,从理论上讲这样可以灵活地操控,但实际上技术要求很高,由于布拉格波长对反射镜角度非常敏感,波长精度控制在 1 nm 以内,因而要求角度控制精度达到 10^{-5} rad 量级,这需要非常精密的控制设备,同时对隔振平台和实验环境要求较高。

本文尝试用相位掩模板方法在拉丝塔上在线制作光纤光栅,根据相位掩模板制作光纤光栅的特点以及拉丝塔在线制作光纤光栅的要求,对相位掩模板的安装、光路的布置和在线监测等问题进行了研究,研制出一套拉丝塔在线制作光纤光栅的装置,并使用此装置在拉丝塔上进行了实验,在线制作出由 164 个无焊点串接的光纤光栅构成的光栅阵列。

2 刻写装置

拉丝塔拉制光纤的过程如图 1 所示,光敏光纤预制棒通过送棒装置引入高温熔炉进行熔丝,在计算机的精确控制下,裸光纤以一定速度竖直拉制。拉制过程中,精确调整光纤预制棒的位置和拉丝速度,在光纤测径仪的监测下,拉制成直径稳定均匀的裸光纤。为保证光纤机械强度,对裸光纤进行两次涂覆并固化。裸光纤经过两次涂覆和固化后,再进行张力测量和长度测量,然后收盘保存。

为了在拉制的光纤上刻写光栅,刻写装置必须布置在光纤一次涂覆装置之前,因为光纤涂覆层会

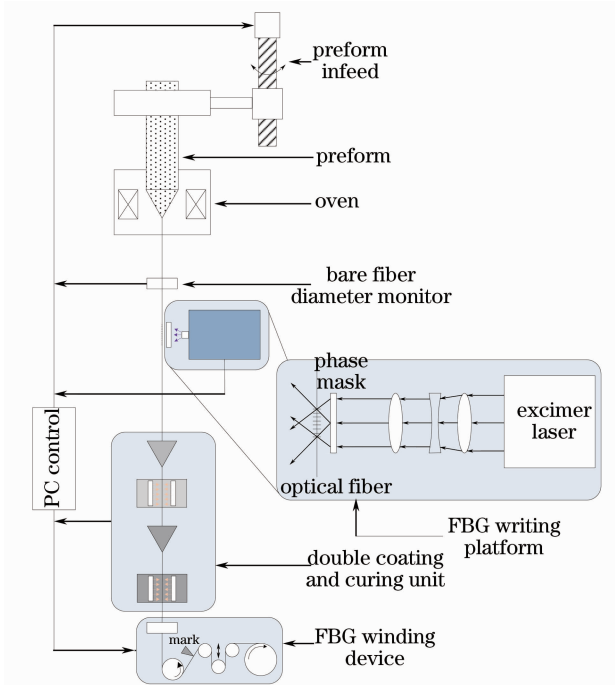


图 1 拉丝过程中制作光纤布拉格光栅装置
Fig. 1 Setup for the fabrication of fiber Bragg gratings during the drawing of a fiber

吸收刻写光栅的紫外光。刻写光栅装置如图 1 中的插入图所示,激光器为波长为 248 nm 的准分子激光器,光斑尺寸为 $6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,相位掩模板的掩模尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,为了充分利用光斑能量和改善光斑质量,用一个凸透镜和一个凹透镜对光斑进行缩束整形,然后通过聚焦柱透镜将光束聚焦在未涂层的光敏光纤上。

在线写光栅与离线写光栅的最大区别在于刻写过程中光纤的运动状态,离线写光栅时,光纤处于静止状态,光栅制作可以通过多脉冲或长时间曝光的积累效应来完成;而在线写光栅时,光纤处于运动状态,曝光延时将造成光栅感光条纹的展宽,展宽宽度为

$$\Delta\Lambda = vt, \quad (1)$$

式中 v 为拉丝速度, t 为曝光延时。实验中所使用的相位掩模板条纹周期 $\delta = 899.2 \text{ nm}$,所产生的紫外光干涉条纹周期为

$$\Lambda = \frac{\delta}{2} = 449.6 \text{ nm}. \quad (2)$$

实验中所用拉丝塔的最慢拉丝速度为 3 m/min ,这意味着曝光延时超过 $9 \mu\text{s}$ 。由于条纹展宽等于条纹周期,此时是无法写出光栅的(实际上曝光延时超过 $5 \mu\text{s}$ 时均无法写出好的光栅)。目前商用准分子激光器的最高频率为 2 kHz ,脉冲间隔为 $500 \mu\text{s}$,也就是说拉丝塔在线刻写光栅不可能使用多脉冲刻写光

栅,只能使用单脉冲激光进行光栅刻写。另外激光脉冲有一定的宽度,一般准分子激光的脉冲宽度为10~20 ns,这样也会造成光栅条纹微小的展宽。实验中所用拉丝塔的最快拉丝速度为200 m/min,准分子激光器的脉冲宽度为10 ns,光栅条纹展宽量为33.3 nm,不到条纹周期的8%,若拉丝速度降低,展宽量会进一步减小,因此用单脉冲在拉丝塔上进行弱光栅在线刻写(光栅反射率很小)是可行的。

离线制作光纤光栅时,光纤与光斑焦线的对准主要靠移动光纤来实现,而拉丝塔控制光纤过程中,光纤位置是固定的,光纤与光斑焦线的对准只能通过调整激光器和透镜来实现,相对于离线光栅制作,装置更复杂,光路调整难度更大。因此,本课题组特别设计了一个可以实现多维调节的光学平台,将准分子激光器放置在此平台上,激光器的出光位置和角度可进行调整,另外每个透镜都安装在可以实现多维调节的调整架上。这样通过对激光器和透镜的综合调整,将光斑焦线聚焦到光纤上,完成光栅刻写。

3 在线监测

拉丝塔在线制作光纤光栅有一定的特殊性,其关键因素是要稳定、可靠,要求一次性成功。与普通离线制作光栅不同,拉丝塔在线制作光栅中途不能停止,各调整装置也不能随意变动,否则易造成光栅刻写失败,同时若存在光栅漏刻写,从某种程度上意味着前功尽弃。因此,为了保证制作过程的稳定性和可靠性,在考虑装置结构稳固性的同时,对关键地方进行实时在线监测和快速调整。制作过程中分别对光纤与掩模板平行状况及距离、紫外光焦线与光纤的相对位置进行重点监测。

光纤与掩模板的相隔距离和平行状况决定了刻写光栅的质量,在光纤拉制过程中各部件难免会由于温度变化、机械振动等因素而发生位置变化,对此必须及时发现并迅速调整。实验中采用双显微摄像头进行监测,装置如图2所示,两支显微摄像头固定在掩模板夹具上,摄像头可以多维灵活调整,两个摄像头分别对准光纤位于掩模板基片两边的部分,并尽可能保证两摄像头对准的角度和距离相同。两支显微摄像头接口接入计算机,监测画面显示在计算机显示器上。通过对比两支显微摄像头的监测画面,来判断光纤与相位掩模板的距离和平行状况。

照射到光纤纤芯中的紫外光有足够大的光功率密度是成功制作光纤光栅的重要条件,为此一般需要将紫外光聚焦到光纤上,而且聚焦的焦线比较细,这

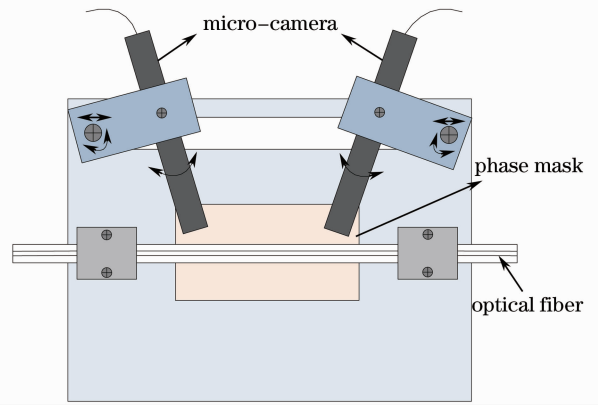


图2 光纤与掩模板的相隔距离及平行状况监测装置
Fig. 2 Monitoring device of the gap and parallel condition between the fiber and phase mask

样就需要保证光纤与紫外光焦线对准。由于一些不确定因素,拉丝过程中,光纤与紫外光焦线有可能偏离,造成曝光量差别过大,甚至是写不出光栅,因此需要对光纤与紫外光焦线的对准状况进行在线监测。

考虑用摄像头成像监测光纤与紫外光焦线的对准状况。普通摄像头成像存在紫外感应和脉冲捕捉的问题,即普通摄像头无法感应紫外光,且实验中所使用的紫外光源是脉冲准分子激光器,波长为248 nm,脉冲宽度为10 ns左右,对于如此短的脉冲光,普通摄像头难以捕捉。为此,在紫外光入射光纤的后面,靠近光纤处,放置一片荧光片,紫外光焦线通过光纤后照射到荧光片上,荧光片受紫外光照射的部分发出可见的荧光,荧光发光时间为几百毫秒,这样就可以用摄像头对荧光光斑进行成像,从而在计算机显示器上对光纤与紫外光焦线的对准状况进行监视。

光斑焦线与光纤对准监测装置如图3所示,显微摄像头位于荧光片后侧,并处在紫外光路上,用于

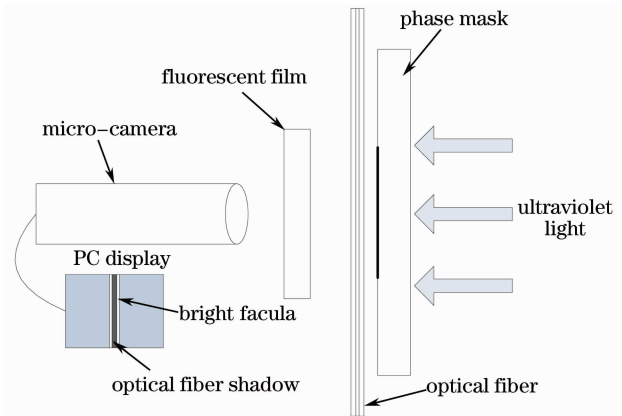


图3 光斑焦线与光纤对准监测装置
Fig. 3 Monitoring device of alignment between facula of focusing line and fiber

监测紫外光焦线与光纤的相对位置。激光器输出脉冲的同时,给出一个同步触发信号触发显微摄像头捕捉光斑图像。若光纤处于聚焦光斑中间,由于光纤的遮挡,图像会显示中间是黑影,周边是亮斑。通过捕捉的光斑图像情况,实时做出调整,保证紫外光焦线与光纤平行、重合,光纤处在紫外光焦线的中间。

4 拉丝塔光栅阵列

利用上述光纤光栅在线刻写装置在拉丝塔上进行了光纤光栅在线刻写实验,实验中所使用的光纤预制棒为长飞光纤光缆有限公司提供的光敏预制棒,所拉制的光纤为单模光纤,光纤拉制速度为12 m/min,激光器脉冲频率为0.04 Hz,脉冲宽度为10 ns,单脉冲能量为10 mJ,光斑焦线面积为 $0.375\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,其最大脉冲能量密度约为 $213.3\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。连续刻写了164个光栅,形成一段815 m的无焊点光栅阵列。

使用光时域反射仪(OTDR)对所刻写的光栅阵列进行了检测,检测结果如图4所示。图4(a)为整体情况,各光栅之间的距离为5 m,间隔均匀。图4(b)为局部细节,各光栅的信号幅度有起伏约为10%的差别,造成这种差别的主要原因包括:1)准分子激光器输出的脉冲能量有10%~20%的波动,造成每个光栅曝光量不同;2)拉丝过程中光纤位置有微小抖

动,而光斑焦线实际有一定的宽度(约0.6 mm)。此外沿宽度方向光强空间分布为高斯分布,光纤处在光斑焦线的不同位置,也会造成曝光量的差别。

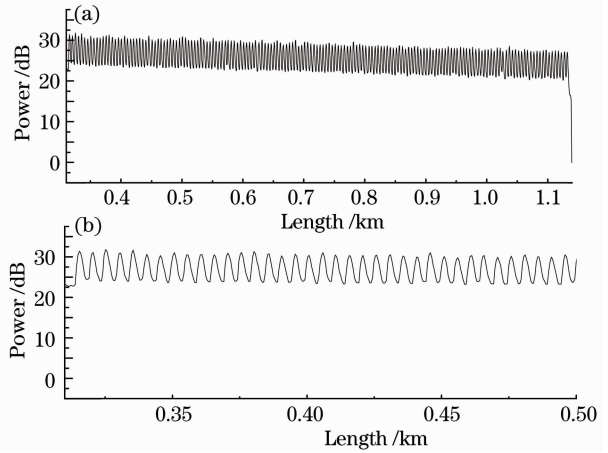


图4 OTDR检测光栅阵列。(a)整体;(b)局部
Fig. 4 OTDR detection of grating array. (a) Integral grating array; (b) local grating

使用光谱分析仪进行光谱检测,图5(a)为单个光栅的反射谱,中心波长为1305.72 nm,反射峰值为124.8 pW,反射率约0.7%,3 dB带宽为0.16 nm,谱型对称性良好。图5(b)为164个光栅的反射谱,中心波长为1305.58 nm,反射峰值为2010 pW,3 dB带宽的展宽是由各光栅的中心波长不一致造成的,中心波长不一致的原因可能来源于光纤拉制过程中张力的微小变化、环境温度的起伏以及光纤光敏性不完全均匀等因素。

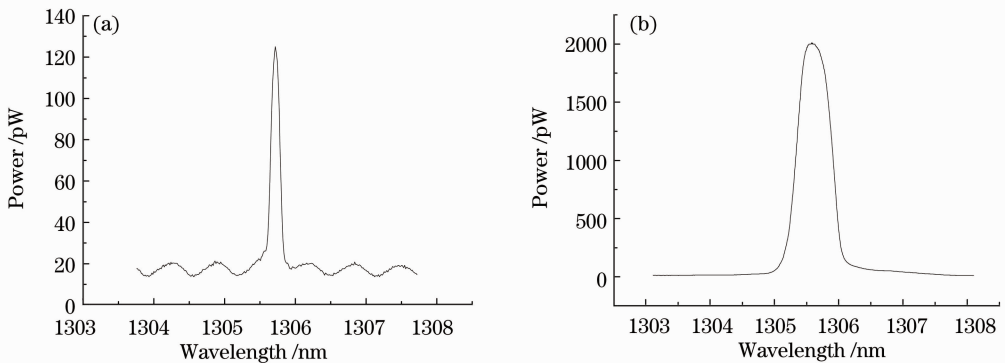


图5 光栅反射谱。(a)单个光栅;(b)光栅阵列
Fig. 5 Reflection spectra of gratings. (a) Single grating; (b) grating array

5 结 论

对相位掩模方法应用于拉丝塔光栅在线制作进行了研究,结合拉丝塔现场条件和光纤拉制的要求,研制出一套基于相位掩模板的拉丝塔光栅刻写装置。这套装置中装有显微摄像系统,可以对光纤与

掩模板平行状况及距离、紫外光焦线与光纤的相对位置进行在线实时监测。采用此装置在拉丝塔上进行了光纤光栅在线刻写实验,使用单模光敏光纤预制棒拉制光纤,连续刻写了164个光栅,形成一段815 m长无焊点串接的光纤光栅阵列,各光栅之间

距离为 5 m,空间间隔均匀,单个光栅反射率约 0.7%,3 dB 带宽为 0.16 nm,光栅反射谱谱形良好,各光栅反射信号平均起伏约为 10%。结果表明,基于相位掩模板的拉丝塔光栅刻写装置可以在线制作无焊点串接的光纤光栅阵列。

参 考 文 献

- 1 M. Rothhardt, M. Becker, C. Chojetzki *et al.*. Strain sensor chains beyond 1000 individual fiber Bragg gratings mode during fiber drawing [C]. OSA/BGPP/Sensor, 2010. JThA53
- 2 Zhang Manliang, Sun Qizhen, Wang Zi *et al.*. Investigation on distributed optical fiber sensor based on identical low reflective fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 080604
张满亮, 孙琪真, 王 梓 等. 基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 080604
- 3 Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 29~33
刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 29~33
- 4 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg sensor system based on wavelength division multiplexing/time division multiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布喇格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 5 Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105004
张晓丽, 梁大开, 芦吉云 等. 高可靠性光纤布拉格光栅传感网络设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105004
- 6 C. G. Askin, M. A. Putnam, H. J. Patrick *et al.*. Fibre strength unaffected by on-line writing of single pulse Bragg gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(15): 1333~1334
- 7 L. Dong, J. L. Archambault, L. Reekie *et al.*. Single pulse Bragg gratings written during fiber drawing [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17): 1577~1578
- 8 C. G. Askins, M. A. Putnan, G. M. Williams *et al.*. Single pulse fabrication of fibre Bragg gratings using a phase conjugated KrF excimer laser [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(11): 885~886
- 9 E. Lindner, J. Morbitz, C. Chojetzki *et al.*. Draw tower fiber Bragg gratings and their use in sensing technology [C]. *SPIE*, 2011, **8028**: 80280C
- 10 M. Becker, J. Bergmann, S. Bruckner *et al.*. Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub picoseconds laser pulses and two beam interferometry [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23): 19169~19178

栏目编辑: 张 腾