

# 基于紫外光刻的微纳光纤布喇格光栅研究

余小草,姜文宁,张 英,周敏雯,李新碗,陈建平

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

**摘 要:**介绍紫外光刻法制作微纳光纤布喇格光栅(MF-BG)的制作工艺,测量并分析不同直径的微纳光纤布喇格光栅的反射谱。数据表明随着微纳光纤的直径变小,光纤光栅的中心波长蓝移且反射强度也随之减小。仿真计算微纳光纤的有效折射率和光纤纤芯的束缚能力(即基模分布在纤芯的能量与基模全部能量的比值),来解释上述变化。

**关键词:**微纳光纤;布喇格光栅;微器件制作;传感

**中图分类号:**TN256 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2011)02-0025-03

## Research on microfiber-based Bragg gratings fabricated by ultraviolet-light exposure

YU Xiao-cao, JIANG Wen-ning, ZHANG Ying, ZHOU Min-wen, LI Xin-wan, CHEN Jian-ping

(State Key Laboratory on Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** We fabricated MicroFiber-based Bragg Gratings (MF-BG) by ultraviolet-light exposure and measured the reflected spectrums of microfiber-based gratings with different diameters. Our experimental results reveal that Bragg wavelength blue-shifts and reflection intensity gradually decreases when microfiber diameter reduces. We investigated the characteristics by numerically calculating the effective refractive index and confinement factor of microfiber with different diameters.

**Key words:** microfiber; micro-fiber Bragg grating (MF-BG); micro-optical devices; sensor

### 0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)作为光通信的基本器件被广泛应用于光通信、多波长光纤激光器和光纤传感<sup>[1-3]</sup>中。常规FBG是在普通单模光纤基础上制作的,然而对于普通单模光纤来说,其规格是固定的,光的能量基本被束缚在纤芯,这就决定了一定长度的常规FBG调制深度是完全相同的。对于光纤传感来说,高灵敏度的环境测量需要调制深度的提高,因此常规FBG不能满足要求。最近,微纳光纤成为国内外各个研究小组的研究热点<sup>[4]</sup>,可以通过采用火焰<sup>[5]</sup>或电加热丝加热<sup>[6]</sup>并拉伸常规光纤的方法制作微纳光纤。微纳光纤具有微米甚至纳米直径、大比例倏逝波传输、高表面能量密度和大波导色散等极好的光学特性<sup>[4]</sup>,所以,基于

微纳光纤的光器件被大量应用于光通信和传感<sup>[4]</sup>中。在微纳光纤中传播的光并不完全被限制在纤芯中传输,其调制深度可以灵活调节,因此,可以通过在微纳光纤上刻光纤布喇格光栅的方法来提高灵敏度。不同直径的微纳光纤在纤芯外倏逝波的分布比例不同,随着微纳光纤直径的变化,微纳光纤布喇格光栅的调制深度就会发生变化。

微纳光纤布喇格光栅可以通过氢氟酸化学腐蚀<sup>[7]</sup>和飞秒激光脉冲照射<sup>[8]</sup>这两种方法制备。然而,这两种方法都有一定的局限性,氢氟酸化学腐蚀的方法操作十分复杂且有一定的危险性,而激光照射的方法需要激光束和微纳光纤之间的精确对准,因此,成功率极低。工业上常用的制造FBG的方法是紫外光刻法,如果能简单地使用紫外光刻法制造微纳光纤布喇格光栅就能确保大批量生产微纳布喇格光纤光栅。

我们使用紫外光刻法在未载氢的微纳光纤上制作微纳光纤布喇格光栅,实验证明这是一种低成本且有效的制作微纳光纤布喇格光栅的方法。测得光栅的3dB带宽为0.3nm,比之前报道的测量结果0.67nm要

收稿日期:2010-11-09。

基金项目:国家973计划(ID2011CB301700)资助;国家自然科学基金项目(60877012, 61071011, 61001074, 61007039, 61007052)资助;上海市重大基础项目(10DJ1400402)资助;上海市重点基础项目(09JC1408100)资助;上海交大研究生创新基金资助。

作者简介:余小草(1985-),女,硕士研究生,主要研究方向为基于微纳光纤的光学器件。

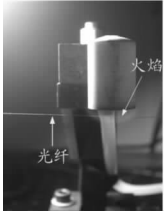


图1 拉伸示意图

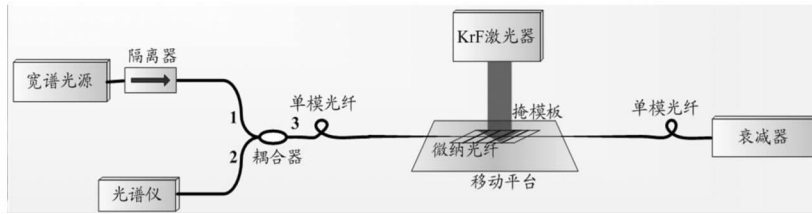


图2 微纳光纤布喇格光栅制作及在线测量的示意图

窄<sup>[8]</sup>,这就说明它可以用于波分复用(WDM)滤波器和更精密的光纤传感。微纳光纤布喇格光栅和其它微纳尺寸器件的集成可用于未来的光学集成芯片中<sup>[9]</sup>。

### 1 微纳光纤光栅的制作工艺

如图1所示,采用氢焰加热的方法将普通单模光纤拉伸为微纳光纤<sup>[10]</sup>。首先,剥去常规单模光纤的涂覆层,并将光纤固定在由两个步进电机控制的平台上;用氢焰加热光纤直至熔融,加热熔融的同时两个步进电机平台向相反方向匀速拉伸光纤;拉伸速率约为0.16mm/s,控制拉伸长度以及火焰的位置就可以得到几微米甚至亚微米直径的微纳光纤。

图2为微纳光纤布喇格光栅制作及在线测量的示意图,将周期为535nm的掩模板紧贴于制备好的微纳光纤上方,然后用紫外光直接照射。照射光源是波长为248nm的KrF激光器,其输出能量为15mJ。光栅写入过程中移动的速率为1mm/min,曝光时间约为10分钟。使用波长范围在1200~1700nm间的宽谱光源测量微纳光纤布喇格光栅反射谱,宽谱光源经过一个隔离器后接入1×2耦合器的1号输入端口,然后经过耦合器的3号端口输出到微纳光纤布喇格光栅,经微纳光纤布喇格光栅反射回来的光波经3号端口进入耦合器,然后从耦合器的2号端口输出进入光谱仪,从光谱仪上即可测得反射谱,微纳光纤布喇格光栅的另一端通过连接衰减器来避免光纤端面反射的影响。图3为不同直径的微纳光纤布喇格光栅的电子扫描显微镜(SEM)照片,可以看出其直径非常均匀且表面平滑。

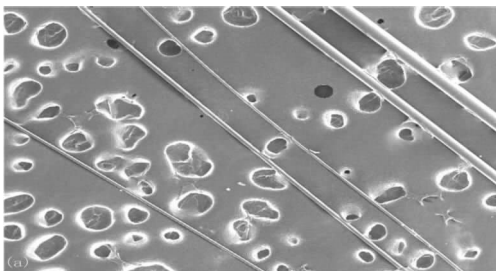


图3 微纳布喇格光纤光栅的SEM照片

### 2 实验结果与分析

为了研究微纳光纤布喇格光栅的特性与微纳光纤直径的关系,我们测量了7根微纳光纤布喇格光栅反射谱(拉伸后的微纳光纤直径分别为83.9μm、

60.4μm、25.9μm、16.2μm、14.8μm、11.9μm和6.61μm),与测量的普通单模光纤布喇格光栅(直径为125μm)的反射谱进行对比。基于有限元方法的计算,我们得到了有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 与纤芯约束因素(基模在纤芯的能量与全部能量的百分比)与微纳光纤直径的关系,如图4所示。当微纳光纤的直径小于20μm时,其有效折射率急剧下降。在微纳光纤直径由125μm减小到50μm的过程中,由75%下降到10%。这表明有相当多的能量成为在纤芯外传播的倏逝波。图4的插图是直径为15μm和50μm微纳光纤中基模的能量分布,从图中可以看出当微纳光纤直径比较小时,纤芯中基模的能量很小;直径较大时,纤芯中基模的能量很大。

图5为实验得出的布喇格反射中心波长和消光比(最大反射功率与噪声的比值)与微纳光纤直径的关系。从图中可以看出,当微纳光纤直径变小时,中心波长发生蓝移(往短波长移动)且反射率减小。这种现象可以由布喇格反射理论解释。根据布喇格反射理论,布喇格反射中心波长为<sup>[11]</sup>:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

$n_{\text{eff}}$ 为微纳光纤有效折射率, $\Lambda$ 为微纳光纤布喇格光栅

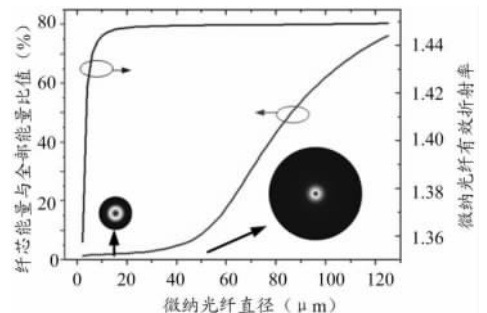


图4 微纳光纤的纤芯约束能力及有效折射率,插入图片是微纳光纤直径为15μm和50μm时基模的能量分布图

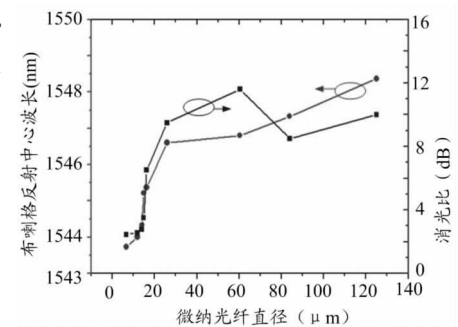


图5 微纳光纤布喇格光栅反射波长与反射率

的周期。在光栅周期一定的情况下,中心波长随  $n_{\text{eff}}$  而改变。因此,其变化趋势与  $n_{\text{eff}}$  类似。另外,中心波长反射率可表示为<sup>[12]</sup>:

$$R = \tanh^2 \left( \frac{\pi \Delta n_{\text{eff}} M_p l}{\lambda} \right) \quad (2)$$

其中,  $\Delta n_{\text{eff}}$  为有效折射率的改变量,  $M_p$  为纤芯导模的能量,  $l$  为光栅长度为中心波长。随着微纳光纤直径的减小,  $M_p$  与  $\Delta n_{\text{eff}}$  同时减小,如图 4 所示。因此,光栅的反射率先是迅速减小而后变化速度减缓。我们还可以通过拉伸纤芯较大的光纤比如多模光纤来提高微纳光纤布喇格光栅的反射率,由于多模光纤测量和分析方法比单模光纤复杂,仍有许多问题需要解决,这里不展开讨论。

图 6 为实验测得的直径为  $25.9\mu\text{m}$  微纳光纤布喇格光栅的反射谱,由于折射率调制深度小且光栅周期大(1cm),其 3dB 带宽约为 0.3nm 比之前报道的微纳光纤布喇格光栅(0.67nm)要窄<sup>[8]</sup>。可以注意到测得的平均输出功率比较小,这主要是因为使用的宽谱光源的输出功率较小。

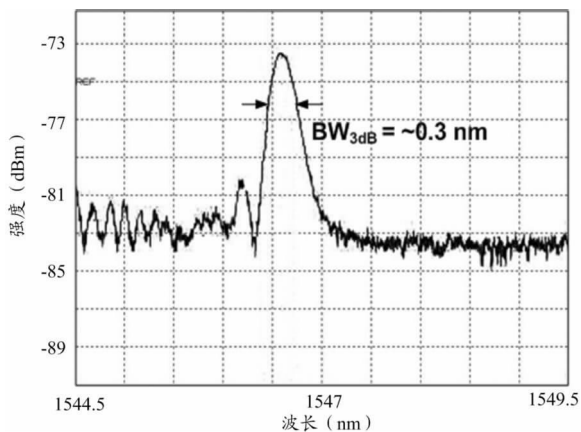


图 6 直径为  $25.9\mu\text{m}$  微纳光纤布喇格光栅反射谱

微纳光纤的调制深度变小的原因以及所导致反射谱的变窄,可由布喇格光栅的反射带宽半宽度公式决定<sup>[11]</sup>:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \sqrt{(\Delta n_{\text{eff}}/2n_{\text{eff}})^2 + (1/N)^2} / 2 \quad (3)$$

其中  $\Delta n_{\text{eff}}$  是紫外光刻后光纤的有效折射率的最大改变量,而  $N$  代表微纳光纤布喇格光栅的周期数。当微纳光纤被拉细后,其单位长度锗的含量降低。这样,UV 光照射所造成的折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  相对于普通光纤来说是变小了。同时,有效折射率  $n_{\text{eff}}$  在  $25.9\mu\text{m}$  时减小的幅度不是很大,如图 4 所示。因此,折射率调制深度  $\Delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}$  减小了。另外,由于光栅长度较长(1cm),光栅周期  $N$  增大,导致反射谱带宽的进一步减小。

### 3 结束语

我们使用紫外光刻法制作微纳光纤布喇格光栅并测得不同直径下微纳光纤布喇格光栅的反射谱,实验结果显示在直径几个微米的微纳光纤上仍可以刻出布喇格光栅来。我们详细讨论了微纳光纤布喇格光栅的中心波长和反射率与微纳光纤直径的关系,仿真理论和实验表明,随着微纳光纤的直径变小( $20\mu\text{m}$  左右)有效折率先是迅速减小而后变化速度减缓从而导致光栅的反射率中心波长向短波长方向飘移和反射率降低。最后给出了一个直径为  $25.9\mu\text{m}$  微纳光纤布喇格光栅的测量光谱曲线,其 3dB 带宽约为 0.3nm,表明其可用于 WDM 信道滤波和对灵敏度要求很高的生物传感中。

### 参考文献:

- [1] LEE H, AGRAWAL G P. Add-drop multiplexers and interleavers with broad-band chromatic dispersion compensation based on purely phase-sampled fiber gratings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 635-637.
- [2] YANG J, TJIN S C, NAM Q N. Multiwavelength tunable fiber ring laser based on sampled chirp fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 1026-1028.
- [3] SHU X, GWANDU B A L, LIU Y, et al. Sampled fiber Bragg grating for simultaneous refractive-index and temperature measurement [J]. Optics Letters, 2001, 26(11): 774-776.
- [4] TONG L, GATTASS R R, ASHCOM J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. Nature, 2003, 426: 816-819.
- [5] SHI L, CHEN X, LIU H, et al. Fabrication of submicron-diameter silica fibers using electric strip heater [J]. Optical Express, 2006, 14(12): 5055-5060.
- [6] LI Y and TONG L. Mach-Zehnder interferometers assembled with optical microfibers or nanofibers[J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 303-305.
- [7] LIANG W, HUANG Y, XU Y, et al. High sensitive fiber bragg grating refractive index sensors[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86: 151122.
- [8] FANG X, LIAO C R, WANG D N. Femtosecond laser fabricated fiber bragg grating in microfiber for refractive index sensing [J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 1007-1009.
- [9] ZHANG Z, QIU M, ANDERSSON U, et al. Subwavelength-diameter silica wire for light in-coupling to silicon-based waveguide[J]. Chinese Optic Letters, 2004, 5(10): 577-579.
- [10] CHEN J, SHEN X, HONG Z, et al. Nanostructure optic-fiber-based devices for optical signal processing [C]. Japan: OECC 2010, invited paper 8E2-1.
- [11] RUSSELL S J P, ARCHAMBAULT J L, REEKIE L. Fiber gratings[J]. Physics World, 1993, (10):41-46.
- [12] LAM D K W, GARSIDE B K. Characterization of single-mode optical fiber filters[J]. Applied Optics, 1981,20(3): 440-441.