

微纳光纤布喇格光栅探针的制备与特性研究

刘全强, 陈娜*, 李聪聪, 刘书朋, 陈振宜

(上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444)

摘要: 为了实现微区温度测量, 研究了化学腐蚀法制备锥形微纳光纤布喇格光栅(MNFBG)探针及其温度传感特性。通过监测 MNFBG 反射谱的变化分析其腐蚀情况, 控制 MNFBG 探针的形成, 并对反射谱进行反演, 可获得锥尖处的温度信息。实验结果表明: 最终制成的锥形 MNFBG 探针, 锥区长为 308 μm , 栅区长度仅为 120 μm , 锥尖直径小于 1 μm , 对温度传感的灵敏度约为 10.5 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。该方法制作的 MNFBG 探针对于微区温度检测具有潜在的应用价值。

关键词: 化学腐蚀法; 锥形光纤布喇格光栅; 光谱分析

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)09-0027-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on of fabrication and character of micro-nano FBG probe

LIU Quanqiang, CHEN Na*, LI Congcong, LIU Shupeng, CHEN Zhenyi

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to realize the micro-zone temperature measurement, a tapered micro-nano fiber Bragg grating (MNFBG) probe and its temperature sensing characteristics were studied by chemical etching. By monitoring the change of MNFBG reflection spectrum, the corrosion condition is analyzed, the formation of MNFBG probe is controlled, and the reflection spectrum is inverted to obtain the temperature information at the tip of the cone. The experimental results show that the final tapered MNFBG probe has a cone length of 308 μm , a gate length of only 120 μm , a cone tip diameter of less than 1 μm , and sensitivity to temperature sensing of approximately is 10.5 $\text{pm}/^\circ\text{C}$. The MNFBG probe fabricated by this method has potential application value for micro-zone temperature detection.

Key words: chemical etching method; tapered fiber Bragg grating; spectral analysis

0 引言

随着传感器的发展趋于小型化, 微小空间的温度检测逐渐成为研究的热点。近年来出现的微纳光纤布喇格光栅(MNFBG)传感器具有抗电磁干扰、不易受腐蚀和尺寸极小等优点, 可用于色散补偿、折射率传感和多参量测量等方面。MNFBG 的制备有将光栅写入微纳光纤^[1-4]和对光纤布喇格光栅(FBG)进行微纳加

工^[5,6]2 种方式。寇君龙等人^[2]在锥尖直径为 5 μm 的纯石英锥形光纤一侧使用聚焦离子束法刻蚀出周期性的凹槽, 凹槽周期为 1.1 μm , 深度为 1.6 μm , 制得的 MNFBG 的温度灵敏度达 22 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ 。Susana Silva 等人^[3]使用熔融拉锥的方法制备锥形光纤, 并在锥形光纤的 125 μm 和 50 μm 直径区域使用飞秒激光器分别写入光栅, 实现温度与氢气浓度的同步测量。K Schroeder 等人^[5]使用侧边抛磨的方法加工 FBG, 得到的 FBG 包层仅有 0.5 μm , 用于折射率的测量, 并在未抛磨的位置用 FBG 测量温度的变化, 除去温度的影响。A. Iadicicco 等人^[6]通过化学腐蚀的方法, 腐蚀 FBG 的包层, 被腐蚀的 FBG 为圆柱状, 直径为 7.5 μm , 由于薄包层的 FBG 对外界折射率敏感, 从而实现温度与折射率的同步测量。上述的 MNFBG 传感器尺寸达到微米级别, 可以应用于较小空间的温度检测, 但是微米级的尺寸限制了可测量的微区大小。

收稿日期: 2018-07-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目“硅锗半导体芯石英包层光纤的制备与特性研究”(项目编号: 61575120)资助。

作者简介: 刘全强(1994-), 男, 河南固始人, 上海大学通信与信息工程学院硕士研究生, 主要研究方向为微型光纤光栅传感方面。参与“硅锗半导体芯石英包层光纤的制备与特性研究”国家自然科学基金项目。曾获得上海大学学业奖学金三等奖。



* 通信作者: 陈娜(E-mail: na.chen@shu.edu.cn)。

为了获得更小尺寸的 MNFBG 传感器, 本文使用化学腐蚀法腐蚀 FBG, 制备出具有圆锥形尖端的 MNFBG 探针。

1 原理

1.1 FBG 传感原理

FBG 的中心波长 λ_B 满足布喇格条件: $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 。其中, n_{eff} 为光栅的有效折射率, Λ 为光栅的周期。当光栅受到外界温度影响, 光栅的有效折射率和周期发生变化。光栅中心波长的变化量 $\Delta\lambda$ ^[7] 可以表示为: $\Delta\lambda = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T$ 。其中, α 为光栅的热光系数, 与有效折射率有关; ζ 为光栅的热膨胀系数, 与周期有关; ΔT 为温度变化量。光栅反射谱中心波长的偏移量与温度的变化量呈线性相关。

1.2 腐蚀原理

本文使用化学腐蚀法^[8]制备 MNFBG 探针, 腐蚀液是浓度为 35% 的氢氟酸溶液, 腐蚀液上方覆盖一层有机溶剂异辛烷防止氢氟酸的挥发。制备的 MNFBG 探针的腐蚀示意图如图 1 所示。由于浸润现象, 光栅的包层壁上吸附少量腐蚀液, 且吸附力、重力和表面张力的相互平衡, 使液面在光纤表面形成弯曲的月牙面; 随着光栅被腐蚀, 包层半径的减少导致表面张力减少, 月牙面逐渐下降, 最终使光栅形成锥形探针。

1.3 微区测温原理

MNFBG 探针微区测温的示意图如图 2 所示。

MNFBG 探针的锥尖接近样品, 光栅处于非均匀

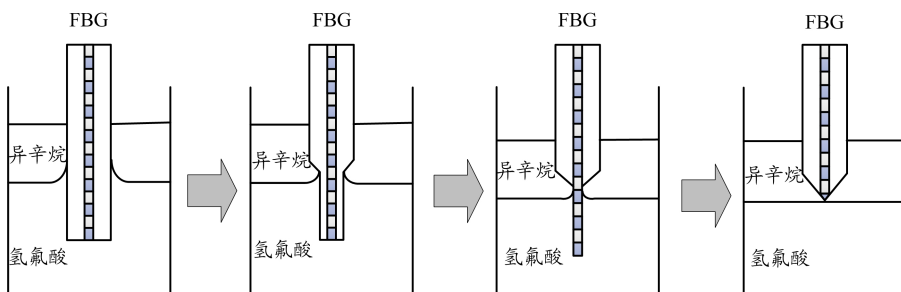


图 1 化学腐蚀法制备光纤光栅探针示意图

2.2 光谱变化分析

当 FBG 被腐蚀 92 min 后得到 MNFBG 探针。腐蚀过程中, 光栅反射谱的变化有 3 个阶段, 每个阶段的光谱各有差异。通过分析光谱的变化了解光栅的腐蚀状况, 进而控制光栅的腐蚀过程。

光栅被腐蚀前 2 个阶段的反射谱如图 4 所示。图 4(a) 为光栅被腐蚀的前 40 min, 是第一个阶段。可以看出, 光纤光栅反射谱基本不发生变化, 这是因为光栅的包层的直径较大, 光在纤芯中的传输模式没有受到外界折射率的影响; 图 4(b) 为光栅继续被腐蚀至 78 min, 是第二个阶段。可以看出, 光谱逐渐向短波长方向移动, 且偏移量变大。此时, 包

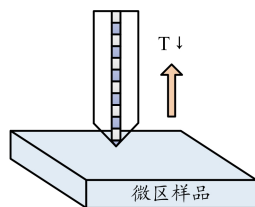


图 2 MNFBG 探针
微区测温示意图

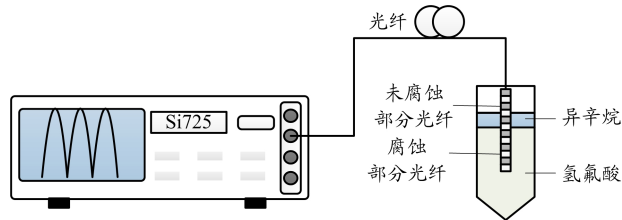


图 3 MNFBG 探针制备实验装置图

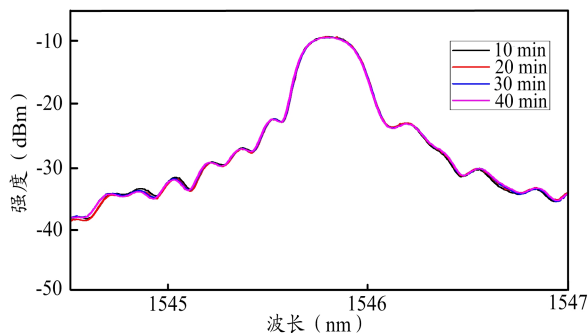
的温度场下。远离锥尖的光栅区受样品温度影响较小, 所以需要 MNFBG 探针的栅区长度在几百微米范围内, 以测量得到包含温度信息的光栅反射谱。然后, 利用传输矩阵法^[9]分析 FBG, 将栅区分为多段子光栅, 当子光栅的长度很小时, 可以将子光栅受到的温度视为均匀的。接着, 将代表每段子光栅传输特性的基础矩阵相乘就可以得到总光栅的传输特性, 再结合光谱反演算法^[10], 通过多次迭代, 使反演光谱接近光栅反射谱, 最终反演出针尖处温度信息。

2 MNFBG 探针的制备及特性分析

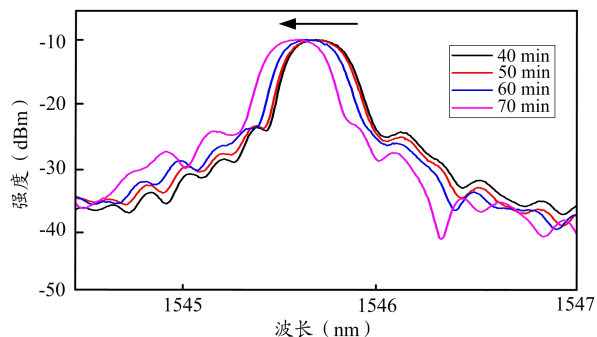
2.1 MNFBG 探针的制备

实验中使用的 FBG 栅区长度为 10 mm, 光栅反射率为 95.53%。首先, 将光栅从栅区中间切开, 可制成 2 根 MNFBG 探针。腐蚀前, 需要计算待腐蚀的栅区长度。利用耦合模理论^[12]中的公式: $R_{\text{max}} = \tanh^2(\kappa L)$, 其中, R_{max} 为最大反射率, L 为栅区长度, κ 为交流耦合系数, 由光栅原始条件求得, 计算出栅区的长度为 4.46 mm。然后, 使用文献[11]中测量弱光栅反射率的方法, 测出待腐蚀光栅的反射率为 57.80%。最后, 将 FBG 固定在一维调整架上, 连接 FBG 解调仪 Si725 观察反射谱。同时, 将光栅平端控制在异辛烷和腐蚀液的交界面处, 调节一维调整架的旋钮, 控制浸入氢氟酸中光栅的长度。制备探针的实验装置如图 3 所示。通过监控光谱的变化控制腐蚀时间, 最终形成针尖尺寸较小的圆锥形 MNFBG 探针。

层的厚度降低到一定程度,光栅形成了纤芯-包层-外界介质的三层结构波导模式^[13]。通过求解三层结构的本征方程可以得到以下结论:光栅的有效折射率随着包层直径的减小而降低^[14]。根据布喇格条件可知,有效折射率的降低会导致光栅的中心波长变小,光谱向短波长方向偏移。



(a) 腐蚀前 40 min, 光栅反射谱变化



(b) 腐蚀前 40~70 min 内, 光栅反射谱变化

图 4 光栅被腐蚀前 2 个阶段的反射谱

光栅从 78 min 直至腐蚀结束,是第三个阶段。此阶段的 FBG 反射谱发生剧烈变化,如图 5 所示。当包层完全腐蚀时,被腐蚀的光栅形成纤芯-外界介质的两层结构,此时光栅相当于纤芯-包层光栅结构与纤芯-外界介质光栅结构的级联。光栅的反射谱有 2 个峰,一个是原始的反射峰,由纤芯-包层结构的光栅形成;另一个是短波长处的反射峰,由纤芯-外界介质结构的光栅形成(腐蚀第 84 min)。由于外界介质的折射率远小于包层折射率,因此光纤的归一化频率更低,光栅的有效折射率更

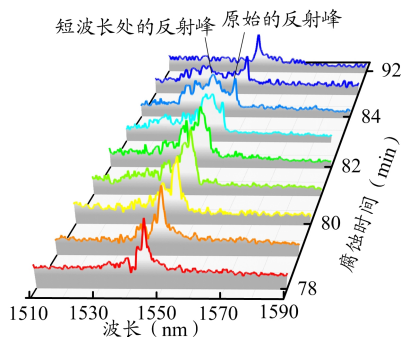
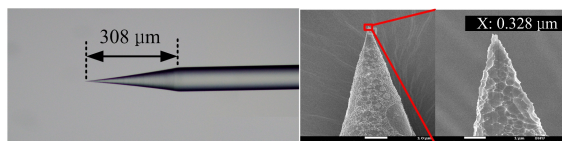


图 5 光栅反射谱变化图

小,光栅的中心波长也更小。纤芯逐渐被腐蚀,栅区内部周期性的折射率变化被破坏,短波长处的反射峰逐渐消失,只剩原始的反射峰。通过监控 FBG 反射谱的变化可知,当出现原始峰时(第 82 min),且再腐蚀约 10 min,最终形成了锥尖尺寸极小的锥尖。

2.3 MNFBG 探针的特性分析

图 6(a)是 MNFBG 探针在显微镜下的形貌图,该探针锥区长 308 μm 。图 6(b)是 MNFBG 探针尖端的电镜图,尖端直径小于 1 μm 。经过计算,探针的反射率为 0.072%,栅区长度为 120 μm ,MNFBG 的栅区存在于锥区前端。

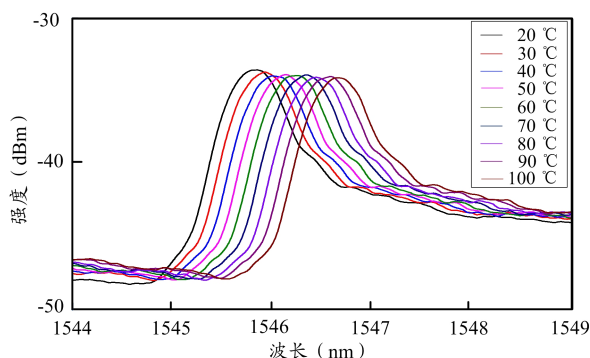


(a) X10 物镜下显微镜图 (b) 电镜图

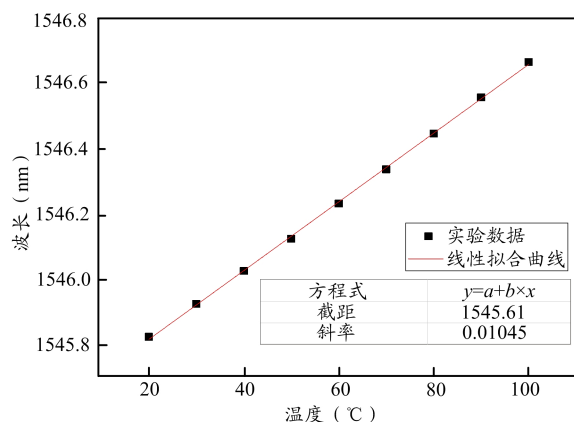
图 6 MNFBG 探针在显微镜下的形貌图

MNFBG 探针用于微区的测温,还需要了解其温度传感特性。本文将 MNFBG 探针放置于温控箱中,记录不同温度下探针的反射谱。MNFBG 在温控箱中的温度标定图如图 7 所示。光栅的中心波长 λ 与温度的变化量 T 满足: $\lambda=1546.614+0.0105T$, 探针的温度灵敏度为 10.5 pm/°C。

参照图 2 的测温方式,我们使用栅区长度为 900 μm 的 MNFBG 探针测量金属铜片的表面温度。铜片通过电烙铁接触传热形成一稳定热源,通过反演 MNFBG 探针测量得到的反射谱,得到探针尖端处的温度信息。实验中为防止损坏探针尖端,探针尖端距离铜片表面约有 3 mm 的空隙。MNFBG 实际测温得到的反射谱反演图与温度反演图如图 8 所示。可以看出,反演反射谱的中心波长与实际反射谱的相同,但是具有较大的带宽。反演得到 MNFBG 探针尖端处的温度为 389K。

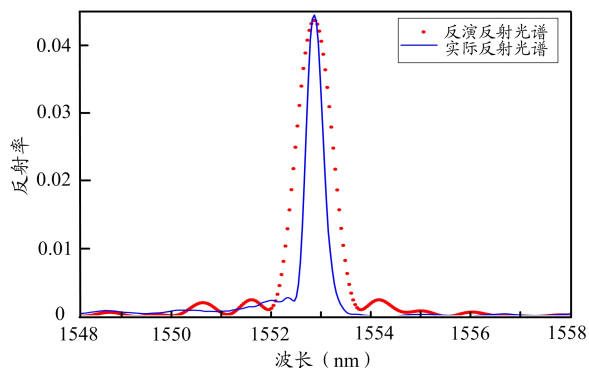


(a) 不同温度下的 MNFBG 探针反射谱

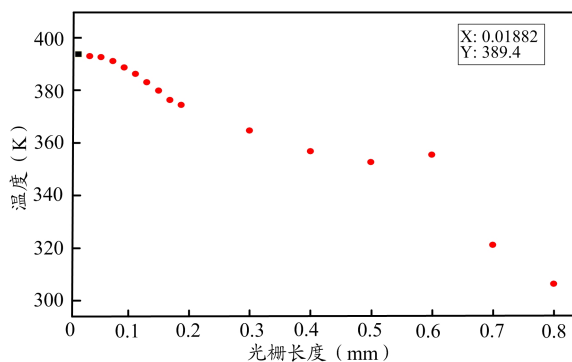


(b) 不同温度对应的 MNFBG 探针中心波长及其线性拟合曲线

图 7 MNFBG 在温控箱中的温度标定图



(a) MNFBG 探针测得反射谱与反演反射谱对比



(b) 反演得到的温度信息

图 8 MNFBG 实际测温得到的反射谱反演图与温度反演图

3 结束语

本文采用化学腐蚀法成功制备了 MNFBG 探针。通过实时监测 FBG 的反射谱变化、控制腐蚀的时间,制得的探针具有亚微米级别的针尖尺寸和百微米长度的栅区。通过实验对探针的温度传感特性进行表征,虽然 MNFBG 探针的反射谱强度很低,仍具有较高

的温度灵敏度($10.5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$)。同时,通过使用 MNFBG 探针测量热源,并反演反射光谱得到了探针尖端处的温度信息。MNFBG 探针具有温度传感特性和满足高分辨率测量的微小尺寸。因此,MNFBG 探针在近场区域的温度测量^[15-16]方面也具有潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] LAZARO J M, QUINTELA A, URBANCZYK W, et al. Bragg Gratings Written in Tapered Solid-Core Photonic Crystal Fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(14): 1048–1050.
- [2] FENG J, DING M, KOU J L, et al. An Optical Fiber Tip Micrograting Thermometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2011, 3(5): 810–814.
- [3] SILVA S, COELHO L, ALMEIDA J M, et al. H2 Sensing Based on a Pd-Coated Tapered-FBG Fabricated by DUV Femtosecond Laser Technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 4(25): 401–403.
- [4] 江微微,赵瑞峰,卫延,等.基于熔融拉锥光纤布喇格光栅的光谱特性[J].中国激光,2010,37(10):2565–2569.
- [5] SCHROEDER K, ECKE W, MUELLER R, et al. A fibre Bragg grating refractometer[J]. Measurement Science & Technology, 2001, 12(7): 757–764.
- [6] IADICICCO A, CAMPOPIANO S, CUTOLO A, et al. Nonuniform thinned fiber Bragg gratings for simultaneous refractive index and temperature measurements [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(7): 1495–1497.
- [7] 乔学光,贾振安,傅海威,等.光纤光栅温度传感理论与实验[J].物理学报,2004,53(2):494–497.
- [8] TAO M, JIN Y, GU N, et al. A method to control the fabrication of etched optical fiber probes with nanometric tips[J]. Journal of Optics, 2010, 12(1): 1–5.
- [9] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277–1294.
- [10] LIU Y, YU Z, YANG H, et al. Numerical optimization and simulation to wavelength-division multiplexing isolation filter consisted of two identical long period fiber grating [J]. Optics Communications, 2005, 246(4-6): 367–372.
- [11] GUO H, ZHENG Y, TANG J, et al. Reflectivity measurement of weak fiber Bragg grating (FBG)[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2012, 27(6): 1177–1179.
- [12] SNYDER A W. Coupled-Mode Theory for Optical Fibers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62: 1267–1277.
- [13] MONERIE M. Propagation in doubly clad single-mode fibers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 535–542.
- [14] IADICICCO A, CUSANO A, CUTOLO A, et al. Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 1149–1151.
- [15] GMELIN E. Sub-micrometer thermal physics - An overview on SThM techniques[J]. Thermochimica Acta, 1998, 310(1-2): 1–17.
- [16] GOMES S, ASSY A, CHAPUIS P. Scanning thermal microscopy: A review[J]. Physica Status Solidi, 2015, 212(3): 477–494.