

文章编号:1002-2082(2016)04-0633-06

基于侧边抛磨光纤的表面布拉格光栅温度传感器

章 勇^{1,2}, 唐 丽^{1,2}, 陈 哲^{1,2}, 余健辉^{1,2}, 钟永春^{1,2}

(1. 暨南大学 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632;

2. 暨南大学 光电工程系, 广东 广州 510632)

摘 要:为了实现在侧边抛磨光纤(SPF)上制作布拉格光栅结构并提高器件设计灵活性,利用重铬酸盐明胶(DCG)作为光刻材料,提出一种新型的光纤表面布拉格光栅制作方法并对该器件温度传感特性进行研究。使用轮式抛磨系统制作 SPF,并在 SPF 侧抛面上旋涂 DCG,通过干涉光束曝光显影制作表面布拉格光栅。光谱测量表明:带有布拉格光栅的侧边抛磨光纤在 1 480.2 nm 处有透射谷,在相应位置反射谱有明显反射峰,其调制幅度达到 15.9 dB,这是由于表面光栅的布拉格反射所致。温度传感实验表明,该布拉格反射峰的温度灵敏度为 17.84 pm/°C。这种器件已在光纤传感和光纤滤波器等方面获得应用。

关键词:侧边抛磨光纤;光纤布拉格光栅;表面光栅;重铬酸盐明胶;温度传感器

中图分类号:TN256

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0408001

Temperature sensor based on surface Bragg grating of side-polished fiber

Zhang Yong^{1,2}, Tang Li^{1,2}, Chen Zhe^{1,2}, Yu Jianhui^{1,2}, Zhong Yongchun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: To fabricate the Bragg grating on the side-polished fiber(SPF) and improve the flexibility of grating design, a novel method for fabricating surface Bragg grating on SPF with dichromate gelatin(DCG) was demonstrated. SPF was fabricated by wheel polishing method and DCG was spin coated on the polished surface of SPF as photoresist. Using holography technique, Bragg grating was fabricated on the polished surface. Spectral measurement results show that a significant reflection peak can be observed at 1 480.2 nm, which is well corresponding to the transmission valley. The modulation amplitude of this reflection peak is up to 15.9 dB, due to the reflection of surface Bragg grating. Temperature sensing experiment results show that with temperature increasing, the reflection peak can have red shift. its sensitivity is 17.84 pm/°C. This fiber sensor has good potential in the application of fiber sensor and fiber filter.

Key words: side-polished fiber; fiber Bragg grating; surface grating; dichromate gelatin; temperature sensor

收稿日期:2016-01-21; 修回日期:2016-04-28

基金项目:国家自然科学基金(61177075;61275046);广东省自然科学基金项目(2014A030313377;2014A030310205;2015A030306046)

作者简介:章勇(1990—),男,安徽安庆人,硕士,主要从事光学材料和光纤光栅的制作与传感研究。

E-mail: ylogreen@163.com

通信作者:钟永春(1975—),男,广西梧州人,博士,副教授,主要从事新型光学材料、光子晶体器件和光纤传感等方面研究。

E-mail: ychzhong@163.com

引言

在光学传感领域,布拉格光纤光栅(FBG)已经过大量的研究并被广泛应用,作为传感器,它质量轻、体积小、便携、抗电磁干扰、精度不受光源强度影响,容易实现复用和分布式传感等优点,它可以应用于温度、应力、扭曲、压力、化学物质浓度等方面的测量^[1-5]。目前制作 FBG 的方法主要有:

1) 全息曝光法。G. Meltz 等人^[6]将掺锗光纤置于两束紫光产生的干涉场中,纤芯材料在强紫外光作用下产生折射率调制,从而在纤芯内部写入光栅;2) 相位掩膜法^[7]。用紫光垂直照射相位掩膜版,利用衍射条纹形成的干涉光场在增敏光纤内部写入光栅;3) 激光刻写法^[8]。利用紫外飞秒激光照射相位掩膜法制备 FBG,通过紫外飞秒激光直接诱导折射率变化来制备光纤光栅;4) 腐蚀法^[9]。先利用飞秒激光诱导折射率变化,然后再利用选择性腐蚀微孔阵列的方法制作 FBG。通过以上方法均只能刻写简单的一维布拉格光栅结构,不能刻写较为复杂的二维及三维结构。标准 FBG 中布拉格光栅位于纤芯内部,光栅与光纤中传输导模在整个纤芯区域内进行耦合,可以获得近 100% 的反射率。但由于光栅位于纤芯内,与外界环境并不充分接触,在传感方面的应用仍有一定的局限性。

DCG 是在全息光学元件制作中一种重要的记录材料,具有高衍射效率、高信噪比、高分辨率等诸多优点^[10-11];同时 DCG 是靠纳米微孔的有序排布记录全息图像的,其结构具有很好的自支撑性,因此,DCG 被广泛应用于制作一些连通性较差的光子晶体结构甚至是一些准晶结构^[12-14],其优良的自支撑性避免了这些光子晶体结构在显影中的塌陷现象,并得到了很好的光子带隙效应。

本文提出一种新的 FBG 制作方法,在侧边抛磨光纤的侧抛平面上旋涂 DCG,经过曝光显影等步骤直接在光纤侧表面形成布拉格光栅。与 Tyson L. Lowder 等人^[15]报道的以侧边抛磨光纤侧抛平面为基底,通过氢氟酸刻蚀在基底上形成表面光栅不同,本文所设计的表面光栅是通过光刻材料曝光显影制作而成;与 Hsu F C 等人^[16]报道的以 PDMS 为模板在 SPF 上制作紫外光胶光栅

相比,具有制作步骤更简单,光栅周期设计更灵活等优点。这种方法可以制作各种复杂的光栅结构,比如啁啾光栅、二维光栅,甚至是准晶光子晶体结构,提高了 FBG 的可设计性,从而通过表面光栅结构的优化可提高光纤器件的性能。

1 样品制作

表面布拉格光栅和纤芯传导模的耦合强度与 2 个因素有关:

1) 侧抛光纤的抛磨深度。相关研究表明^[17],随着抛磨深度的增大,其泄露的光功率越大,即侧抛面上泄露的倏逝场越大。H. J KIM 等人^[18]进一步从实验上研究了不同包层剩余厚度下,长周期光栅的传输光谱特性。当光纤包层的剩余厚度为 2.8 μm 、1.5 μm 、0.3 μm 时,传输谱线中波谷的深度分别为 4.2 dB、7.0 dB、11.5 dB,实验说明随着抛磨深度的增大,光纤纤芯传播模场与光栅耦合效率增大,当光纤剩余厚度为 0.3 μm 时,获得了最大的共振峰。

2) 抛磨区的平坦区长度。抛磨区平坦长度决定了表面光栅与纤芯传导模的耦合长度^[19],耦合长度越大,表面布拉格光栅与纤芯传导模的耦合强度越大。

实验中用到的光纤均为标准单模光纤,利用轮式抛磨法^[17]制备 SPF,使用蔡司显微镜(XS-01-05-001)测量侧边抛磨光纤抛磨区的抛磨深度在光纤纵向的变化(测量精度为 0.1 μm)。图 1 为 SPF 形态特征图,抛磨区长度为 10 mm,抛磨平坦区长度约 5.5 mm,平坦区与光纤底部之间的平均距离为 66.7 μm ,即侧抛光纤的抛磨深度为 58.3 μm ,包层剩余厚度为 0.2 μm 。

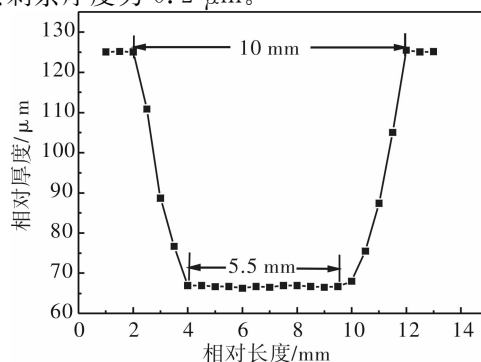


图 1 抛磨光纤形态特征图

Fig. 1 Morphological characteristic of SPF

图2为DCG旋涂过程示意图,将SPF固定在玻璃板上,使抛磨面朝上(图2(a)),在抛磨面上滴上DCG凝胶(图2(b)),把玻片放在旋胶机上,调节转速为2000 r/min,时间为25 s,使DCG凝胶均匀附着在SPF侧抛平面上(图2(c)),在侧抛平面上得到DCG膜层厚度为 $3.81\ \mu\text{m}$ (图2(d))。

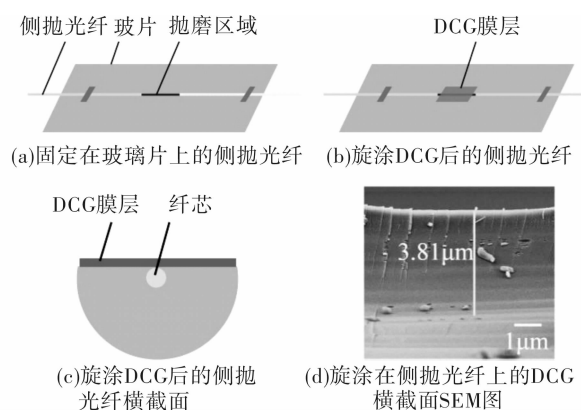


图2 DCG旋涂过程示意图

Fig. 2 Sketch of spin coating process

图3为曝光光路图,采用442 nm He-Cd激光器(KIMMON IK4301R-D)作为光源,激光被扩束后,经过棱镜准直,利用光阑控制光斑大小,激光光束从直角棱镜的斜边入射,一部分折射光经棱镜的直角边全反射后与另一部分折射光干涉,产生干涉条纹。干涉区域为2个半圆形光斑区域的重合,通过调节激光与直角棱镜的夹角 α 可以改变干涉条纹的周期。为了避免干涉光束在玻璃界面以及光纤内表面上的多次反射对干涉条纹造成影响,在样品和直角棱镜之间使用折射率匹配液以减小界面间的反射,曝光光强为 $0.3\ \text{mW}/\text{cm}^2$,曝光时间为3 min。

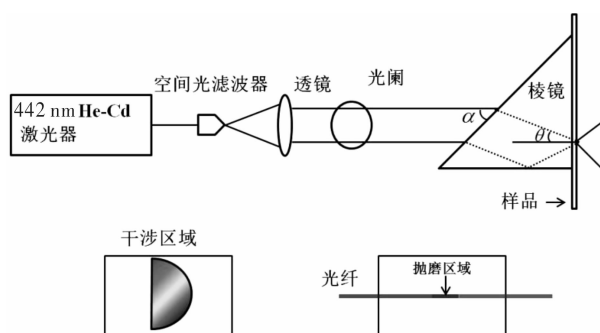


图3 曝光装置图

Fig. 3 Exposure device figure

DCG凝胶是由重铬酸铵、明胶、水混合而成, Cr^{6+} 在明胶内均匀分布,不与明胶分子反应。在蓝紫光的作用下, Cr^{6+} 经过一系列化学反应转变成 Cr^{3+} , Cr^{3+} 与明胶分子中部分基团交联,形成硬化区。当在干涉条纹下曝光时,曝光区和未曝光区形成硬度差。显影时,曝光部分和未曝光部分的脱水速率不同,产生的应力变化导致曝光区和未曝光区之间形成微小的缝隙,产生折射率调制^[20]。

实验中使用的重铬酸铵、明胶、水的配胶比例为1.1:7:30,称取1.1 g重铬酸铵,7 g明胶,30 g蒸馏水,放在磁力搅拌器中搅拌1 h,搅拌温度为 $50\ ^\circ\text{C}$ 。

DCG薄膜的折射率用阿贝折射仪测量得到, $n_{\text{DCG}}=1.530$,棱镜折射率 $n=1.5163$,激光入射直角棱镜的角度 $\alpha=45^\circ$,干涉角度 $\theta=17.044^\circ$, $\lambda=442\ \text{nm}$ 。干涉条纹周期^[21]:

$$\Lambda = \lambda / 2n_{\text{DCG}} \sin \theta \quad (1)$$

代入相关数据,得到 $\Lambda=492.8\ \text{nm}$ 。

曝光完成后,将样品放在 $80\ ^\circ\text{C}$ 加热台上加热12 min,使 Cr^{3+} 与明胶分子充分交联。加热过程结束后待样品冷却,置于 $10\ ^\circ\text{C}$ 水中吸水10 min,明胶充分吸水膨胀,未发生反应的 Cr^{6+} 会溶于水,被稀释掉,而 Cr^{3+} 由于与明胶分子交联则停留在明胶内,不溶于水,产生硬度差。吸水膨胀后再分别放置于 $70\ ^\circ\text{C}$ 异丙醇、 $30\ ^\circ\text{C}$ 正丁醇中脱水5 min,从而在曝光区域与未曝光区域之间产生周期性的折射率变化。

2 测试

图4是光纤布拉格光栅透射光谱和反射光谱的检测光路图,Y型光纤耦合器可以用来测量FBG的透射光谱和反射光谱,它可以实现对两根光纤之间的耦合以及将一根光纤中传输的光以任意分光比耦合进入两根光纤,测试中使用的Y型光纤耦合器的分光比为50:50,工作波段为C+L波段。首先将超连续光源(Fianium S450-4)发出的激光通过透镜聚焦输入到光纤耦合器的3号端口,光源激光经过耦合器耦合进入1号端口,在1号端口处连接FBG,FBG的另一端连接到光谱分析仪(OSA, ANDO AQ6317C),测量FBG的透射

光谱;满足光纤 Bragg 光栅反射条件的光反向传输,经过 Y 型耦合器后以 50 : 50 的比例耦合进入

2 号端口和 3 号端口,在 2 号端口连接 OSA,实现 FBG 反射光谱的测量。

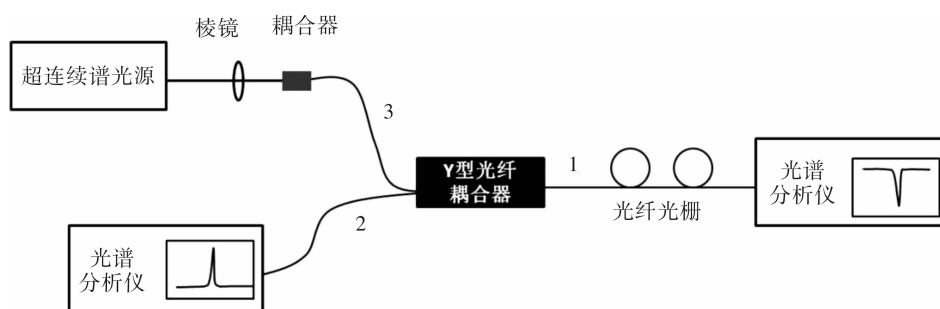


图 4 FBG 透射谱和反射谱检测装置图

Fig. 4 Detection device for FBG transmission spectrum and reflection spectrum

图 5 为光纤布拉格光栅光谱曲线图,其中黑线为光纤布拉格光栅的透射光谱曲线,布拉格波长中心位于 1 480.2 nm,其深度为 5.0 dB,半高宽为 6.2 nm;虚线为光纤布拉格光栅的反射光谱曲线,布拉格反射峰位置正好对应透射光谱谷的位置,其高度为 15.9 dB,半高宽为 3.1 nm。在反射谱中其半高宽更窄且调制深度更高,我们认为这是由于透射谱受到光源光谱及侧边抛磨光纤本身透射谱的影响,使其透射峰展宽且减小了调制深度。

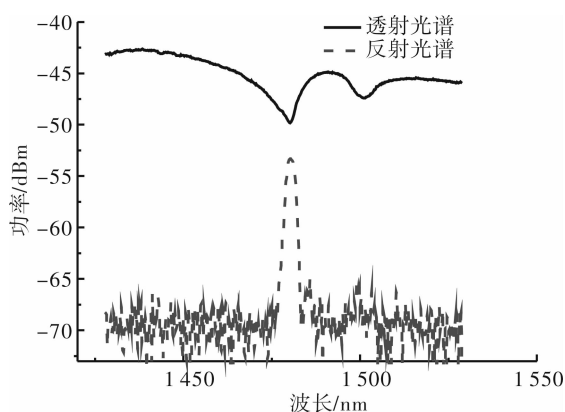


图 5 FBG 光谱图

Fig. 5 FBG spectrum

根据光纤布拉格光栅中心波长满足 bragg 方程^[22]:

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

光栅的有效折射率:

$$n_{eff} = \sqrt{n_{air}^2 \cdot f + n_{DCG}^2 \cdot (1-f)} \quad (3)$$

式中 f 为空气的占空比 $n_{air} = 1$, $f = 10\%$, 则布拉格中心波长:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda = 1\,464.2\text{ nm} \quad (4)$$

计算得到的布拉格波长位置与通过光谱测量

得到的布拉格中心波长位置相差 1.1%,这是由于曝光时,角度误差造成的。若实际激光入射棱镜与棱镜斜边的角度 α 为 46° 时,即角度产生 1° 的误差,则光栅的实际周期为 507.2 nm,布拉格波长为 1 508.2 nm,其误差率达到 3.0%。实验中误差为 1.1%,对应曝光过程中角度 α 存在 0.3° 的偏差。

图 6 为光纤布拉格光栅传输光谱的温度响应曲线,在温度响应测试中,使用精密管式温控仪 (ECOM. LCO 102) 作为控温装置,控制精度为 0.1°C , OSA 为检测装置,设置分辨率为 0.02 nm , 温度变化范围为 $30^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$, 每隔 5°C 记录一次数据,当温度升高时布拉格光栅的周期增大,在 $30^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 温度范围内,布拉格反射峰中心波长红移 0.81 nm。

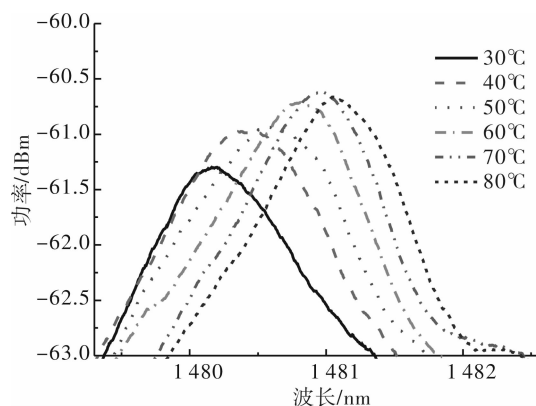


图 6 FBG 反射谱随温度变化的光谱移动曲线

Fig. 6 Reflection spectrum of FBG shift curve with temperature change

用线性拟合的方式对布拉格反射峰中心波长数据点进行拟合(图 7),得到温度灵敏度系数 $\eta = 17.84\text{ pm}/^\circ\text{C}$, 波长和温度变化呈很好的线性关

系,其线性拟合度达到 0.986 7。

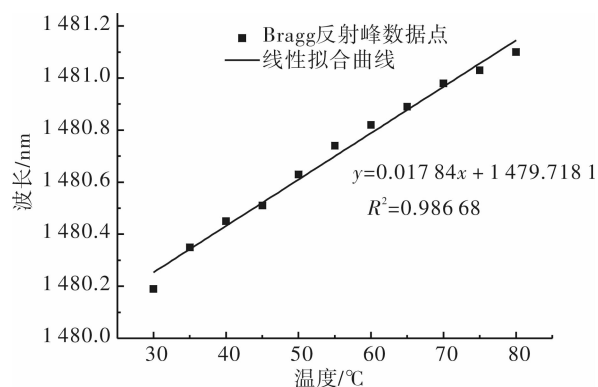


图 7 光纤布拉格光栅 Bragg 中心波长的温度响应曲线

Fig. 7 Temperature response curve of FBG Bragg wavelength

3 结论

本文利用侧边抛磨光纤,在侧抛平面上制作布拉格光栅,通过光谱测量,布拉格波长中心位置位于 1 480.2 nm,与理论计算结果一致,在温度传感实验中,随着温度的升高,布拉格反射峰红移 0.81 nm,其温度灵敏度系数为 17.84 pm/°C。本文提供了一种在侧边抛磨光纤上制作表面光栅方法,由于 DCG 的高衍射效率和高分辨率,其结构具有自支撑特性等优点,可以应用于制作更复杂的二维及三维光子晶体结构,进一步提高 FBG 的可设计性。

参考文献:

- [1] Kersey A D, Berkoof T A. Fiber-optic Bragg-grating differential-temperature sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(10):1183-1185.
- [2] Kersey A D, Berkoof T A, Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. IEEE Electronics Letters, 1992, 28(3):236-238.
- [3] Liu W S, Guo Tu, Wong A C, et al. Highly sensitive bending sensor based on Er^{3+} -doped DBR fiber laser [J]. Optics Express, 2010, 18(17):17834-17840.
- [4] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical in-fiber grating high-pressure sensor [J]. IEEE Electronics Letters, 1990, 29(4):289-399.
- [5] Falciai R, Mignani A G, Vannini A. Long period gratings as solution concentration sensors [J]. Sensor and Actuators B: Chemical, 2001, 74(1-3):74-77.
- [6] Melt G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg grating in optical fiber by a transvers holographic method [J]. Optical Letters, 1989, 14(15):823-825.
- [7] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by uv exposure through a phase mask [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62 (10):1035-1037.
- [8] Dragomir A, Nikogosyan D N, Zagorulko K A, et al. Inscription of fiber Bragg grating by ultraviolet femtosecond radiation [J]. Optics Letters, 2003, 28(22):2171-2173.
- [9] Yang Rui, Yu Yongsan, Chen Chao, et al. Rapid fabrication of microhole array structured optical fibers [J]. Optics Letters, 2011, 36 (19):3879-3881.
- [10] Lessard R A, Manivannan G. Holographic recording materials: an overview [J]. SPIE, 1995, 2405:2-23.
- [11] Jiao Ren. The development of dichromated gelatin holographic plate [J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(2):39-42.
- [12] Kok M H, Lu W, Lee J C W, et al. Lasing from dye-droplet photonic crystals with graded layers in dichromate gelatin emulsion [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(15):151108-1-151108-3.
- [13] Wang X, Kok M H, Lu W, et al. Visible range lasing in dye-droplet double periodic layered structures in dichromate gelatin Emulsions [J]. Journal of Optics, 2012, 14(14):15104-1-15110-7.
- [14] Kok M H, Lu W, Tam W Y, et al. Lasing from dye-droplet icosahedral quasicrystals in dichromate gelatin emulsions [J]. Optics Express, 2009, 17 (9):7275-7284.
- [15] Lowder T L, Smith K H, Ipson B L, et al. High-temperature sensing using surface relief fiber Bragg gratings [J]. Photonics Technology Letters, 2005, 17(9):1926-1928.
- [16] Hsu F C, Chen F T, Ho C T. To fabricate Bragg grating on D-shaped optical fibre by micro-pressing method [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 311:472-476.
- [17] Jiang Peifan, Chen Zhe, Zeng Yingxin, et al. Optical propagation characteristics of side-polished fibers [J].

- Simiconductor Optoelectronics, 2006, 27(5): 578-581.
- 江沛凡, 陈哲, 曾应新, 等. 侧边抛磨光纤的光传输特性研究[J]. 半导体光电, 2006, 27(5): 578-581.
- [18] Kim H J, Kown O J, Lee S B, et al. Measurement of temperature and refractive index based on surface long-period gratings deposited onto a D-shaped photonic crystal fiber[J]. Applied Physics B, 2010, 102(1): 81-85.
- [19] Chang B J, Leonard C D. Dichromated gelatin for the fabrication of holographic optical elements[J]. Applied Optics, 1979, 18(14): 2407-2417.
- [20] Shankoff T A, Curran R K. The mechanism of hologram formation in dichromated gelatin [J]. Applied Optics, 1970, 9(7): 1651-1657.
- [21] Othonos A. Fiber Bragg gratings[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(68): 4309-4341.
- [22] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Lightwave Technology Journal of, 1997, 15(8): 1263-1276.