

电极放电对光纤光栅光谱特性的影响

郑文宁¹ 祝连庆^{1,2,3} 庄炜¹ 辛璟焘¹

¹北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016

²光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100101

³生物医学检测技术及仪器北京实验室, 北京 100101

摘要 采用电极脉冲电弧放电激励紫外曝光刻写的光纤布拉格光栅(FBG),重点研究了电极在栅区不同位置放电对光纤光栅光谱特性的影响。实验发现,在电极放电激励时,光栅反射率下降,光谱展宽并红移,放电引起的光谱变化具有可逆性。采用传输矩阵方法,在理论上分析了光纤光栅在电极放电产生的非均匀温度场下的光谱特性,与实验结果吻合。特别地,当电极在栅区中心位置放电时,光栅反射率下降幅度达到最大,反射谱峰值比无电极放电时小 12 dB,表现出开关量特性。

关键词 光栅; 光纤布拉格光栅; 非均匀温度场; 电极放电; 开关量传感器; 局部放电检测

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0706003

Influence of Electrode Discharge on Fiber Bragg Grating Spectral Characteristics

Zheng Wenning¹ Zhu Lianqing^{1,2,3} Zhuang Wei¹ Xin Jingtao¹

¹Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China

²Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing 100101, China

³Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument, Beijing 100101, China

Abstract The electrode pulsed arc discharge excitation experiments on fiber Bragg grating (FBG) inscribed by ultraviolet exposure are reported. The effect of discharging at different grating positions on the spectral characteristics of fiber grating is studied especially. Experimental results show that the reflectivity of fiber grating is decreased, the grating spectrum is broadened and shows a red shift during electrode discharge excitation. The spectral changes induced by discharge are reversible. The spectral characteristics of fiber grating are analyzed in a non-uniform temperature field formed by electrode discharge with the transfer matrix method, and the theoretical results are in good agreement with the experimental results. Specifically, when the electrode discharges in the center of fiber grating, the decline amplitude of grating reflectivity reaches to maximum and the optical reflection spectrum is 12 dB less than initial spectrum, which shows switching characteristic.

Key words gratings; fiber Bragg grating; non-uniform temperature field; electrode discharge; switching sensor; partial discharge detection

OCIS codes 050.2770; 060.3735; 060.2430; 060.2270; 060.3738

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器由于具有灵敏度高、体积小、易与光纤耦合、不受电磁干扰等优点^[1],广泛应用于结构健康监测^[2]、航空航天、石油化工、船舶航运、民用工业、电力^[3]以及医学等领域。

收稿日期: 2016-02-23; 收到修改稿日期: 2016-03-12

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT1212)、北京市重大科技计划项目(Z151100003615010)

作者简介: 郑文宁(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: winning1990@163.com

导师简介: 祝连庆(1963—),男,博士,教授,主要从事光纤传感和光纤激光器、光电检测技术方面的研究。

E-mail: zhulianqing@sina.com(通信联系人)

自从 Hill K O 等^[4]采用驻波干涉法制成了世界上第一个光纤光栅以来,有关光纤光栅的刻写方法的研究^[5-11]发展迅速。近年来发展了紫外曝光刻写、高频 CO₂ 激光脉冲写入、聚焦离子束写入、逐点写入和在线写入等刻写方法。目前最成熟且应用最广泛的光纤光栅刻写方法是基于相位掩膜的紫外曝光刻写方法,采用传统紫外曝光法刻写的光纤光栅,折射率改变仅仅发生在具有光敏性的光纤纤芯内,且折射率沿着轴向呈周期性分布。

在 FBG 制作过程中,将普通掺锗光纤进行载氢处理以提高光纤的光敏性,当特定波长的紫外光照射载氢光纤时,纤芯被照部分中的氢分子立即与锗发生反应形成 Ge-OH 键和 Ge-H 键,使该部分的折射率增大,从而提高了光栅的反射率。刻写过程结束后,因为 Ge-OH 键不稳定,温度升高会使 Ge-OH 键退化还原,进而导致光栅的反射率降低^[12],影响了光栅的性能,所以需要对制作完成的光栅进行退火处理^[13]来消除不稳定的 Ge-OH 键,以保证光栅的测量精度。

国内外研究人员对 FBG 的温变特性做了一些研究工作。例如,国外的 Hidayat A 等^[14]发现温度变化可以诱导光栅反射率的可逆变化,原因是温变导致纤芯折射率变化;国内的周丽等^[15]利用理论仿真分析了不同光纤光栅参数对 FBG 传感器性能退化的影响,得出高温会导致光栅纤芯折射率和折射率调制深度变小的结论;张玲等^[16]实验研究了飞秒激光脉冲能量远低于光纤的损伤阈值情况下,脉冲激光对 FBG 光谱的影响,发现曝光时光谱红移,随着曝光时间的增加该变化逐渐趋于饱和,但很少有人研究电极放电产生的非均匀温度场对 FBG 光谱的影响。

为了研究电极放电对光纤光栅光谱特性产生的影响,本文进行了相关实验,研究了电极在不同位置放电时的光纤光栅光谱特性,采用传输矩阵方法,理论上分析了光纤光栅在电极放电产生的非均匀分布场下的光谱变化,实验结果与理论一致。研究结果对光栅光谱的调制应用具有重要意义,一方面为研发开关量 FBG 传感器提供了基础实验依据,另一方面为检测局部放电信号提供了新的方法。

2 实验方案与结果

实验装置如图 1 所示。宽带光源连接 1×2 光纤耦合器(3 dB)的 1 端口,光谱分析仪连接到 2 端口,光纤光栅传感器连接耦合器的 3 端口,将光纤光栅传感器两端固定在电极放电装置的夹具上,通过调整参数使得电机带动电极在栅区附近任意移动。在栅区不同位置进行电极放电处理,并对光纤光栅光谱进行实时监测。实验中所用宽带光源为实验室自行研制的放大自发射(ASE)光源,输出功率为 13.3 dBm,波段范围为 C+L 波段(1525~1610 nm);光谱分析仪为日本横河公司的 AQ6370D 型,其波长分辨率为 0.02 nm,扫描范围 600~1700 nm;光栅使用紫外曝光法自制的光纤光栅,为了保证光栅的性能,刻写之前需要对光纤进行高压低温载氢,载氢时间 10 天。然后利用准分子激光器对载氢光纤进行紫外曝光,制作的 FBG 中心波长为 1544.48 nm,栅区长度为 10 mm,强度为 10 dB,栅距为 530 nm。实验中使用美国 3SAE 公司生产的光纤涂层自动剥除机(3SAE FPU11)作为电极放电装置,对光栅栅区进行电极放电。实验装置如图 2 所示。

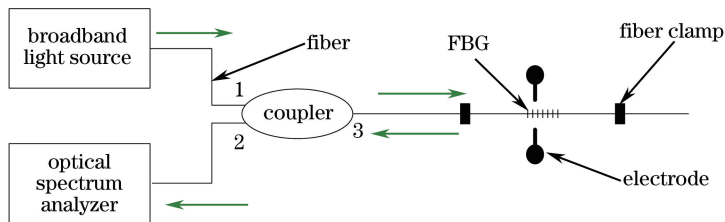


图 1 光纤光栅受电激励实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram for FBG under electrical excitation experimental setup

为了研究 FBG 透射谱在不同扫描放电次数下的变化规律,如图 3 所示,规定光栅中心为原点,光纤轴向从左到右为 z 轴正方向。设置电极放电功率为固定值 110 mW,每次放电扫描,电极按速度 0.1 mm/s 沿 z 轴正向扫过整个栅区。在扫描开始前,记录下 FBG 原始透射谱,然后重复进行放电扫描,每次扫描结束后观察 FBG 透射谱。根据观察到的透射谱变化趋势,记录在第 1、10、30、50 次放电扫描结束后的透射谱。

图 4 为第 1、10、30、50 次放电扫描结束后记录的 FBG 透射谱和原始透射谱。由图中曲线可以看出,经

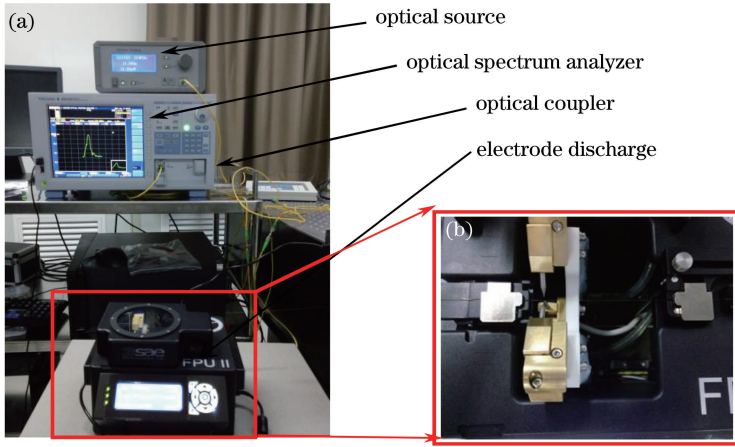


图 2 (a) 实验装置照片; (b) 局部装置照片

Fig. 2 (a) Photo of experimental setup; (b) local photo of setup

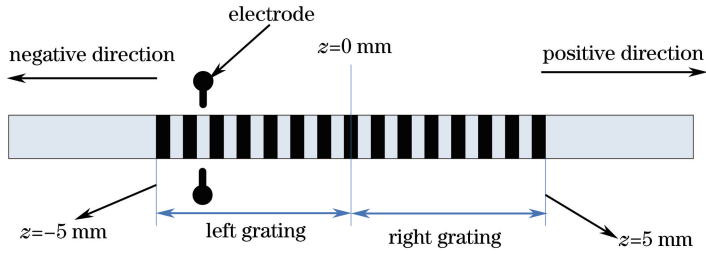


图 3 扫描方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of scanning

过第 1 次电极扫描放电后,FBG 透射谱峰值明显下降,中心波长红移。随着实验次数的增多,FBG 透射谱的峰值降低,带宽变宽。在经过 50 次电极扫描放电实验后,光栅的透射光功率趋于稳定达到 -45.5 dB 左右,中心波长基本不变。

实验中发现,扫描过程中 FBG 光谱变化对于光栅中心有对称性,不同位置电极放电时 FBG 的光谱如图 5 所示。由图可知,随着电极从 $z = -5$ mm 处开始扫描放电,FBG 的反射谱峰值逐渐减小;当扫描到 $z = 0$ mm 处时,FBG 反射谱峰值强度达到最低,经过 $z = 0$ mm 之后,反射谱峰值又逐渐增加;当扫描到 $z = 5$ mm 时,反射谱与 $z = -5$ mm 处的反射谱相同。

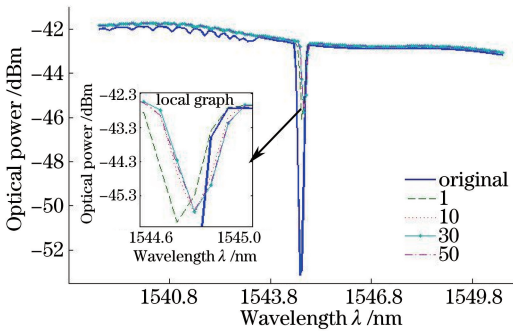


图 4 不同扫描放电实验次数下的 FBG 透射谱变化规律

Fig. 4 Variation of FBG transmission spectrum with different discharge scanning cycles

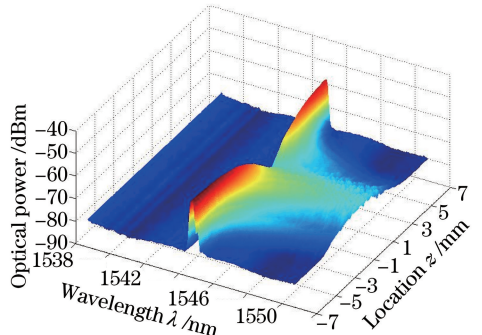


图 5 电极在扫描栅区不同位置放电时 FBG 的反射谱

Fig. 5 FBG reflection spectrum under electrode discharging at different grating positions

图 6(a)表示电极在左侧栅区的 6 个不同位置观察到的反射光谱,从光谱图可以看出,电极放电位置使得 FBG 反射谱带宽展宽并红移,反射谱峰值逐渐降低。当 $z = 0$ mm 时,即电极处于栅区中点时,此时反射谱与初始反射谱出现明显偏差,反射谱峰值强度下降 12 dB。图 6(b)是对 FBG 反射谱的归一化处理。图 7

为栅区中心放电和不放电时的 FBG 透射谱对比,由图可知,持续放电时透射谱的峰值减小消失,峰值功率表现出开关量变化特性,并且现象具有可重复性。

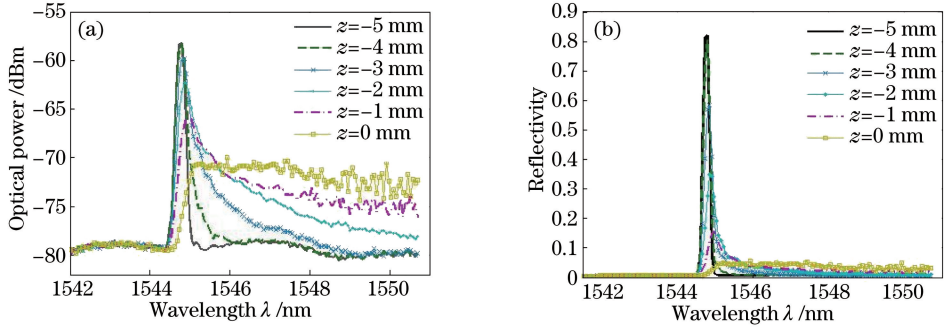


图 6 (a) 电极在左侧栅区不同位置放电时的 FBG 反射谱; (b) 归一化光谱

Fig. 6 (a) FBG reflection spectrum under electrode discharging at different positions in left gate; (b) normalized spectrum

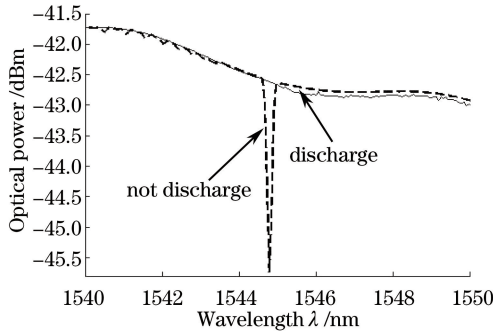


图 7 电极在栅区中心位置放电与未放电时 FBG 透射谱对比

Fig. 7 Comparison of FBG transmission spectrum under electrode discharging and not discharging at grating center

3 理论及结果分析

色心模型^[17-18]认为,由于紫外光的作用,载氢掺锗石英光纤中的阳离子被激发到连续分布的能量阱式能态中,构成新的缺陷中心,形成相对应的阱式能态。在高温条件下不稳定的阳离子吸收能量,当能量足以克服相应能量壁垒时,阳离子被释放到原来位置。随着电极放电实验次数的增多,能量阱中阳离子总数逐渐减少,导致光栅透射率增强,当反应稳定后,透射率趋于饱和,与图 4 表现的透射谱峰值变化规律一致。温度变化引起的热膨胀效应导致光栅周期变化,同时温度变化引起的热光效应导致光栅有效折射率变化,这两种效应均会使光栅中心波长漂移,但其热膨胀效应导致的光栅波长中心变化值比热光效应导致的波长中心变化值要小一个数量级^[19],因此只需考虑热光效应而忽略其他效应的影响。热光效应导致折射率变化表示为

$$\Delta n = \gamma \times \Delta T, \tag{1}$$

式中 Δn 为折射率变化值, γ 为热光系数。

由模式耦合理论可知,FBG 传感器反射回来的中心波长 λ_B 与光栅有效折射率 \bar{n}_e 和光栅周期 Λ_0 满足关系^[20]:

$$\lambda_B = 2\bar{n}_e\Lambda_0, \tag{2}$$

由(1)~(2)可知:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda_0\Delta\bar{n}_e = 2\gamma\Lambda_0\Delta T, \tag{3}$$

由于一般光纤玻璃材料 γ 为 $8.6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$,那么由温度升高造成的热光效应会使得光栅有效折射率增大,光谱红移,与图 4 实验结果一致。

光纤光栅可以看作是由多个具有独立感知能力的子栅集构成^[21],如图 8 所示,当电极放电时,电极聚集的高能量电离附近空气,产生热等离子体,随着热等离子体密度的增加,释放出大量热量,每次电弧脉冲放电

时,都会有热量累积,进而在电极附近形成不均匀的温度场。在非均匀温度场下,栅区各位置处的子栅集感受到不同的温度,将会得到不同波长的子反射谱,整体上呈现出光纤光栅啁啾展宽谱。

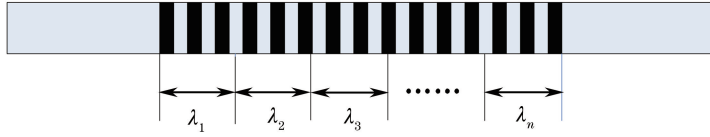


图 8 光纤光栅啁啾化传感示意图

Fig. 8 Schematic diagram of optical fiber grating chirp-sensing

电极放电形成的轴向非均匀温度场 $T(z)$ 可以表示为

$$T(z) = a \exp [b(z + \Delta z)] + T_0, \quad (4)$$

式中 a, b 为常数, z 为电极所在的轴向位置, Δz 为电极左右移动的距离, 取 T_0 为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。利用传输矩阵方法对光纤光栅光谱进行计算, 数值计算参数如下: 光纤有效折射率为 1.45485, 边缘可见度为 0.8, 光栅长度为 10 mm, 周期 530.8 nm, 折射率调制深度 1×10^{-4} , 光栅分段数为 100, 热光系数取 $8.6 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 。对处于假设温度场 $T(z)$ 下不同位置的 FBG 啁啾谱进行数值计算, 计算结果如图 9 所示。由图 9 看出, 计算结果与实验结果图 6 光谱变化规律相似, 表明提出的温度场模型可以描述电极放电产生的非均匀温度场。在该温度场中, FBG 反射谱随电极位置移动而展宽并红移。

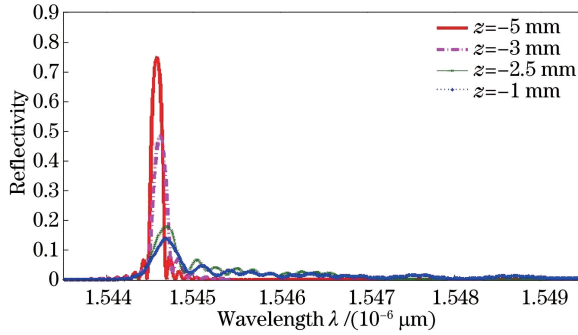


图 9 温度场 $T(z)$ 下的光纤光栅光谱

Fig. 9 Optical fiber grating spectrum under temperature field $T(z)$

电极在不同栅区位置时放电对 FBG 峰值波长和反射谱峰光功率的影响, 分别如图 10(a) 和 (b) 所示。从图 10(a) 中可以看出, 随着电极放电位置向栅区中心位置的移动, FBG 的峰值波长值逐渐增大, 这是因为随着电极脉冲能量的增加, 电极聚集放电时产生的高能量在电极附近累积产生热效应, 温度升高使得光栅每个周期的平均有效折射率增大, 波长红移。图 10(b) 所示为电极在不同栅区位置时放电的 FBG 反射谱峰值光功率图, FBG 峰值光功率随着电极放电位置的变化而递减。当电极到达栅区中心位置时, FBG 反射谱峰值光功率与原始状态差值达到最大, 相差高达 12 dB, 符合非均匀场光纤光栅反射光强响应特性^[22]。相应

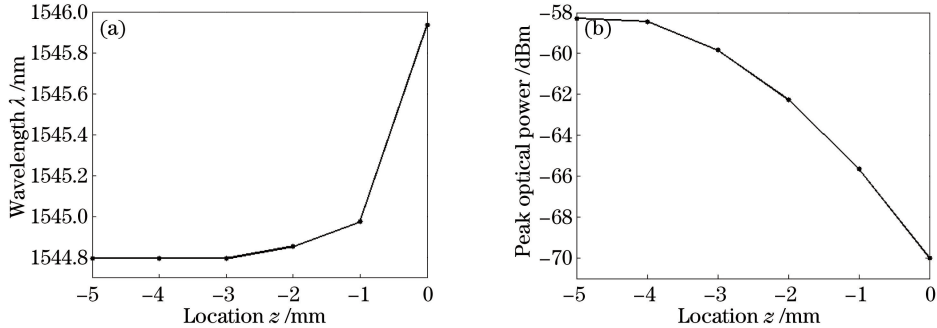


图 10 (a) 轴向不同位置放电时的 FBG 峰值波长; (b) 反射谱峰值光功率图

Fig. 10 (a) Peak wavelength of FBG with different axial positions while discharging;

(b) peak optical power of reflection spectrum

地,当该非均匀温度场靠近栅区位置时,诱导光纤光栅纤芯折射率发生改变,从而使得光栅透射率增大。当该温度场位于光栅栅区正中心位置时,栅区中心温度高于两侧,此时折射率改变最大,FBG透射率趋于饱和并达到最大,与实验结果(图7)一致。

4 结 论

研究了电极放电对FBG光谱特性的影响,利用电极对栅区放电实验,归纳了电极放电位置与峰值波长和反射谱峰值光功率的关系。从非均匀温度场诱导介质折射率变化产生啁啾的角度出发,利用传输矩阵方法,建立非均匀温度场模型,数值计算分析了电极放电对FBG光谱特性产生的影响。实验结果与理论分析吻合较好。研究表明,电极放电引起的光纤光栅光谱变化与其产生的非均匀温度分布有关,主要表现在:随着电极沿光纤轴向运动,非均匀温度场导致光栅有效折射率发生改变,反射谱峰值功率先下降后上升,光谱变化对于光栅中心有对称性。特别地,当电极位于光纤光栅栅区中心位置放电时,反射谱峰值差值为12 dB,光栅表现出明显的开关量特性,该特性在光纤开关量器件、新型光纤光栅解调与局部放电检测等领域具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- Jiang D S, He W. Review of applications for fiber bragg grating sensors[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002, 13(4): 420-430.
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
- Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage detection based on long-gage fiber Bragg grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010604.
田石柱, 温科, 王大鹏. 基于长标距FBG传感器宏应变技术的损伤识别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010604.
- Zhang Kaiyu, Zhao Hong, Zhang Weichao, *et al.*. Fiber Bragg grating electrostatic voltage sensor based on uniform strain beam[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0306003.
张开玉, 赵洪, 张伟超, 等. 基于等应变梁的光纤光栅静电电压传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0306003.
- Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- Zhou K, Dubov M, Mou C, *et al.*. Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(16): 1190-1192.
- O'Regan B J, Nikogosyan D N. Femtosecond UV long-period fiber grating fabrication with amplitude mask technique[J]. Optics Communications, 2011, 284(24): 5650-5654.
- Miao F, Zhang L, Feng D J, *et al.*. Inscription of long period fiber gratings using 800 nm femtosecond laser[J]. Optics & Precision Engineering, 2012, 20(4): 685-691.
苗飞, 张玲, 冯德军, 等. 应用800 nm飞秒激光制备长周期光纤光栅[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 685-691.
- Jörg B, Christian W, Günter F, *et al.*. Point-by-point inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with electro-optic amplitude modulated femtosecond laser pulses[J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 540-543.
- Hu Jin, Pu Donglin, Wei Guojun, *et al.*. A method of dot-matrix holography based on the diffraction grating and spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609006.
胡进, 浦东林, 魏国军, 等. 基于衍射光栅和空间光调制器的点阵全息光刻方法[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609006.
- Liu Dandan, Wang Yong, Ye Zhen, *et al.*. Grating fabrication of 808 nm distributed feedback semiconductor laser by holographic photolithography[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202008.
刘丹丹, 王勇, 叶镇, 等. 全息光刻制备808 nm分布反馈半导体激光器的光栅[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202008.
- Dong X R, Sun X Y, Li H T, *et al.*. Femtosecond laser fabrication of long period fiber gratings by a transversal-scanning inscription method and the research of its orientational bending characteristics[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 71: 68-72.
- Li J Z, Jiang D S. Hydrogen loading and fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Material Research, 2006, 20(5): 517-

522.

李剑芝, 姜德生. 载氢与光纤布喇格光栅[J]. 材料研究学报, 2006, 20(5): 517-522.

- 13 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. Research development of high-temperature resistant fiber gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050003.
杨樟成, 徐汉锋, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050003.
- 14 Hidayat A, Wang Q, Niay P, *et al.*. Temperature-induced reversible changes in the spectral characteristics of fiber Bragg gratings[J]. Applied Optics, 2001, 40(16): 2632-2642.
- 15 Zhou Li, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Mechanism and experimental research on performance degeneration of fiber Bragg grating affected by temperature[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405007.
周 丽, 梁大开, 曾 捷, 等. 温度影响光纤光栅传感器性能蜕化机理及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405007.
- 16 Zhang Ling, Miao Fei, Feng Dejun, *et al.*. Exposure experiment study of fiber Bragg grating by femtosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0505006.
张 玲, 苗 飞, 冯德军, 等. 飞秒激光对光纤布拉格光栅的曝光实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505006.
- 17 Dekker P, Ams M, Marshall G D, *et al.*. Annealing dynamics of waveguide Bragg gratings: evidence of femtosecond laser induced colour centres[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3274-3283.
- 18 Janer C L, Carballar A, Navarro L, *et al.*. Photosensitivity color-center model for Ge-doped silica preforms[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(4): 6100511.
- 19 Zhao Mingfu, Cao Lihua, Luo Binbin, *et al.*. Study on spectral response of raised cosine apodized FBG under non-uniform temperature field[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(2): 184-189.
赵明富, 曹李华, 罗彬彬, 等. 非均匀温度场下升余弦变迹 FBG 的光谱响应研究[J]. 半导体光电, 2014, 35(2): 184-189.
- 20 Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Zhao Jianlin, *et al.*. Temperature-insensitive acceleration sensing technology based on π phase of double fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0205006.
刘钦朋, 乔学光, 赵建林, 等. 双光栅 π 相位差温度不敏感加速度传感技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0205006.
- 21 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang, *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 828-834.
郭 团, 刘 波, 张伟刚, 等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 828-834.
- 22 Tuan G, Liyang S, Hwa-Yaw T, *et al.*. Tilted fiber grating accelerometer incorporating an abrupt biconical taper for cladding to core recoupling[J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20651-20660.