

文章编号: 1001-3806(2017)05-0649-05

基于电弧等离子体的光纤光栅快速退火的研究

李 凯¹, 辛璟焱¹, 夏嘉斌^{1,2}, 祝连庆^{1,2*}

(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. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为了实现光纤布喇格光栅的快速退火, 采用高温电弧等离子体热处理光纤光栅的方法, 设计了相关实验进行验证。由实验可知, 透射谱深度 23dB、中心波长 1552.09nm、3dB 带宽 0.2784nm 的光纤光栅, 经电弧等离子体放电扫描后, 光纤光栅的透射谱深度减小, 3dB 带宽变窄, 中心波长蓝移; 随着重复扫描次数的增加, 各参量变化趋势减缓, 最终透射谱深度减小 13dB、中心波长蓝移 0.84nm、3dB 带宽变窄 0.1013nm; 将电弧等离子体处理后的光纤光栅放入高温炉 24h 退火后, 透射谱深度、中心波长、3dB 带宽均不再发生变化。结果表明, 将电弧等离子体用于光纤布喇格光栅的退火处理是可行的, 并且具有周期短、涂覆层无损伤的优点。

关键词: 光栅; 退火; 电弧等离子体; 光谱特性

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.05.006

Research of rapid annealing of fiber Bragg gratings based on arc plasma

LI Kai¹, XIN Jingtao¹, XIA Jiabin^{1,2}, ZHU Lianqing^{1,2}

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to realize rapid annealing of fiber Bragg gratings, high temperature arc plasma heat treatment method was adopted. The related experiments were designed for verification. A fiber Bragg grating (FBG) with transmission spectrum depth of 23dB, central wavelength of 1552.09nm and 3dB bandwidth of 0.2784nm was scanned by arc plasma discharging. The results show that the transmission spectrum depth is reduced, the 3dB bandwidth is narrowed and the central wavelength shows blue shift. The variation trend of each parameter is slowed down with the increasing of the repetitive scanning times. Finally, the transmission spectrum depth is reduced by 13dB, the central wavelength is shifted blue by 0.84nm and the 3dB bandwidth is narrowed by 0.1013nm. After fiber gratings annealed in a high temperature furnace for 24h, the transmission spectrum depth, central wavelength and 3dB bandwidth remain the same. It is feasible to use arc plasma for the annealing of FBG with the advantages of short cycle and no damage of the coating layer.

Key words: gratings; annealing; arc plasma; spectral characteristics

引 言

光纤布喇格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器对被测信息采用波长编码的方式, 具有体积小、抗干扰能力强、灵敏度高且易于组网、复用等优点^[1]。目前已在民用工程、电力行业、航空航天、生物医学、环境

监测等诸多领域发挥着日益重要的作用^[2-6]。

自 1978 年第 1 根布喇格光纤光栅问世以来, 光纤光栅的制备方法就受到了国内外学者的广泛关注。发展至今, 已有紫外曝光制备法^[7]、高频 CO₂ 激光脉冲写入法^[8]、飞秒激光逐点写入法^[9]、腐蚀刻槽制备法^[10]、离子束注入法和机械微弯制备法^[11] 等刻写方法。而基于相位掩模板的紫外曝光刻写技术, 因其简单灵活, 对光源的相干性要求不高, 便于光纤光栅的大规模生产, 成为目前使用最为广泛的一种方法。该方法对于光纤的光敏性具有较强的依赖性, 在刻写之前, 需要对光纤进行增敏处理。相比于掺杂、火焰轻擦等增敏方法, 载氢增敏技术具有简单易行且成本较低的优势, 是目前提高光纤光敏性的主流方法^[12]。当载氢光纤受到紫外光照射时, 光纤中的氢分子与硅、锗原子

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2015AA042308); 国家自然科学基金面上资助项目(51675053); 教育部“长江学者和创新团队”发展计划资助项目(IRT1212)

作者简介: 李 凯(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhulianqiang@sina.com

收稿日期: 2016-11-14; 收到修改稿日期: 2017-01-06

发生化学反应,形成 Ge—OH、Si—OH 等化学键和缺陷中心^[13-14],进而影响了纤芯的有效折射率。刻写完成后,光纤中未发生反应的氢分子和不稳定的 Ge—OH 键,会造成光栅光学特性的不稳定,从而导致光纤光栅的测量精度的下降^[15]。因此,为了消除光纤中残余的氢分子和不稳定的 Ge—OH 键,需要对制备完成的光纤光栅进行退火处理。退火后,光纤光栅的透射谱深度、3dB 带宽减小,中心波长蓝移^[16]。

目前,对于光纤光栅的退火多使用高温炉。该退火方式缺点明显,退火时间较长,同时会破坏光纤表面涂覆层。因此,找到一种快速高效的退火方法对缩短光纤光栅制备周期具有重要的意义。电弧等离子体放电时,产生的温度场分布均匀,瞬时高温可达 1800℃。目前已经广泛地应用于大芯径特殊光纤的熔接^[17],特殊光纤微结构和新型光纤光栅的制备^[18]。本课题组就电弧等离子体放电对光纤光栅光谱特性的影响进行了部分研究,发现电弧等离子体放电激励栅区,紫外激光刻写的 FBG,光栅透射谱大幅下降,光谱蓝移 0.38nm,3dB 带宽减小;飞秒激光刻写的 FBG 透射谱基本保持不变,光谱红移 0.022nm;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 8dB,表现出开关量特性^[19]。其中,电弧等离子体放电对紫外激光刻写 FBG 光谱特性的影响类似于高温退火带来的影响。

作者在此基础上,设计了相关实验,比较了电弧等离子体放电与高温退火对光栅光谱特性的影响,提出了一种基于高温电弧等离子体的 FBG 快速退火的方法。据知,之前还少有采用该方法进行光栅退火的报道。实验发现,受电弧等离子体放电扫描后的光纤光栅,透射谱深度降低,中心波长蓝移,3dB 带宽变窄,表现出类似于高温退火的现象。单次放电扫描的情况下,较高的电弧等离子体放电功率使得光栅透射谱深度在退火后保持不变,但中心波长较之于退火前仍发生了蓝移。该现象表明,单次放电扫描并未实现 FBG 的完全退火。当以一定放电功率重复对栅区进行放电扫描时,随着扫描次数的增加,光纤光栅透射谱深度、3dB 带宽趋于稳定,中心波长不再漂移,最终保持不变。将电弧等离子体处理后的光栅放入高温炉中进行退火。退火前后,光栅光谱保持不变。因此,以一定放电功率的电弧等离子体,对栅区进行多次放电扫描,可以实现紫外激光刻写 FBG 的快速退火。

1 实验方案

本文中采用的实验系统如图 1 所示。从宽带光源

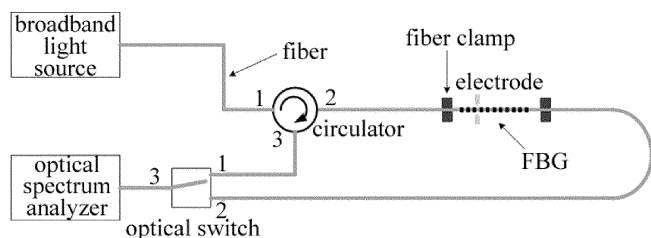


Fig. 1 Experimental setup for FBG excited by arc plasma discharge

被光纤光栅反射回来,再经环形器进入光开关端口 1。另一部分光波经光纤光栅后透射出来,进入光开关的端口 2,光开关的端口 3 与光谱仪相连。通过来回切换光开关,可以实现在同一台光谱仪监测光纤光栅的反射谱和透射谱。光纤光栅的两端分别固定在电弧等离子体的光纤夹具上。其中,光谱仪型号为 YOKOGA-WA 公司的 AQ6370C,分辨率为 0.02nm,扫描波长范围为 600nm ~ 1700nm。宽带光源为实验室自行研制的放大自发辐射光源,输出功率为 13.3dBm,波段为 C + L 波段(1525nm ~ 1610nm)。实验中采用 Corning SMF-28e 光纤,光纤有效折射率为 1.4472。光栅刻写方法采用相位掩模板下准分子激光器紫外曝光的方法。为保证刻写效率,获得高质量的光纤光栅,刻写之前,将光纤放入 80℃、12MPa 载氢罐中进行载氢增敏处理,载氢时间 72h。

电弧等离子体为美国 3SAE 公司生产的光纤涂层自动剥除机(3SAE FPUII)。放电扫描方式,从左至右,对整个栅区进行扫描。共进行两组实验,首先进行单次电弧等离子体放电扫描实验,实验中采用不同放电功率,而扫描速率相同,为 0.15mm/s。其次进行多次电弧等离子体放电扫描实验,实验中放电功率恒定 55mW,扫描速率为 0.15mm/s。

2 实验结果与讨论

2.1 单次电弧等离子体放电扫描

规定以光纤光栅的最左端为起始点,电弧等离子体放电从左至右,对整个栅区进行扫描。实验中所需的 6 根光纤光栅,栅区长度均为 10mm,将其分别标记为 I, II, III, IV, V, VI。I 号光纤光栅为参考光栅。设置电弧等离子体放电功率为 30mW,40mW,50mW,60mW 和 70mW,以 0.15mm/s 的速率分别对 II ~ VI 号光纤光栅的栅区进行放电扫描,扫描次数 1 次。扫描结束后,将 I ~ VI 号光栅放入高温炉中进行退火。

表 1 是第 1 组实验中 I ~ VI 号光纤光栅初始、放电扫描后、高温退火后的透射谱深度、中心波长、3dB 带宽的值。从表中可以看到,参考光纤光栅经过高温退火后,透射谱深度由原来的 14dB 减小至 11dB,II 号光纤光栅经电极放电扫描后的透射谱深度为 12dB,退

Table 1 The grating parameters of I -VI fiber gratings at different stages

label	parameter	original	after discharging	after annealing
I	transmission/dB	14		11
	wavelength/nm	1552.49		1551.74
	3dB bandwidth/nm	0.2054		0.1818
II	transmission/dB	14	12	11
	wavelength/nm	1552.84	1552.8	1552.07
	3dB bandwidth/nm	0.2029	0.1895	0.1774
III	transmission/dB	14	10	10
	wavelength/nm	1552.33	1552.22	1551.54
	3dB bandwidth/nm	0.2097	0.1758	0.1763
IV	transmission/dB	14	8	8
	wavelength/nm	1552.89	1552.75	1552.08
	3dB bandwidth/nm	0.205	0.1574	0.159
V	transmission/dB	14	6	8
	wavelength/nm	1552.61	1552.36	1552.2
	3dB bandwidth/nm	0.1942	0.1411	0.1405
VI	transmission/dB	14	4	4
	wavelength/nm	1552.58	1552.17	1552.14
	3dB bandwidth/nm	0.2012	0.1306	0.1301

火后的透射谱深度为 11dB。电弧等离子体放电扫描后,Ⅲ~Ⅵ号光栅透射谱深度均低于 11dB,高温退火后透射谱深度保持不变,仍为 11dB。经电弧等离子体放电扫描后,Ⅱ~Ⅵ号光纤光栅的中心波长蓝移。高温退火后,中心波长较之于退火前,仍发生了一定量的蓝移。

由上述可知,较之于退火前,经高功率放电扫描的 FBG 透射谱深度在退火后未发生变化,但中心波长有一定量的蓝移。该现象说明在单次放电扫描的情况下,单纯地提高电弧等离子体的放电功率,可以使 FBG 透射谱深度达到退火要求,但中心波长却无法满。为了使经过电弧等离子体处理后的 FBG 在退火

后,透射谱深度、中心波长均不发生改变,本文中进行了下一步实验,即在一定放电功率下,增加放电扫描次数。

2.2 多次电弧等离子体放电扫描

设置电弧等离子体放电功率为固定值 55mW,以光纤光栅的最左端为起始点,电弧等离子体放电从左至右,以 0.15mm/s 的速率对整个栅区来回进行扫描,扫描次数记为 N 。光纤光栅初始透射谱深度 14dB,中心波长 1552.57nm,3dB 带宽 0.2057nm,栅区长度 10mm。光纤光栅标记为 14dB-FBG。

图 2 为第 0 次、第 1 次、第 10 次、第 20 次、第 50 次放电扫描结束后记录的 14dB-FBG 透射谱。由图中曲线可以看出,经过第 1 次电极扫描放电后,透射谱深度、3dB 带宽明显下降,中心波长蓝移明显。

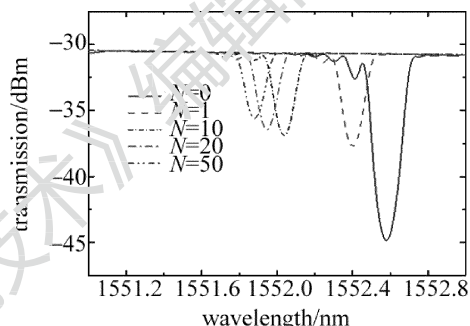


Fig. 2 Relationship between transmission and wavelength of 14dB-FBG under different discharging times

光纤光栅透射谱深度、中心波长、3dB 带宽随实验次数的变化趋势如图 3 所示。随着放电次数的增多,FBG 的透射谱深度、中心波长、3dB 带宽变化逐渐平缓,最终保持不变,达到饱和。饱和状态下的光纤光栅透射谱深度为 5dB,中心波长 1551.90nm,3dB 带宽 0.1771nm。将饱和后的光纤光栅放入高温炉中进行退火处理。对比退火前与退火后的透射光谱和反射谱,如图 4 所示。

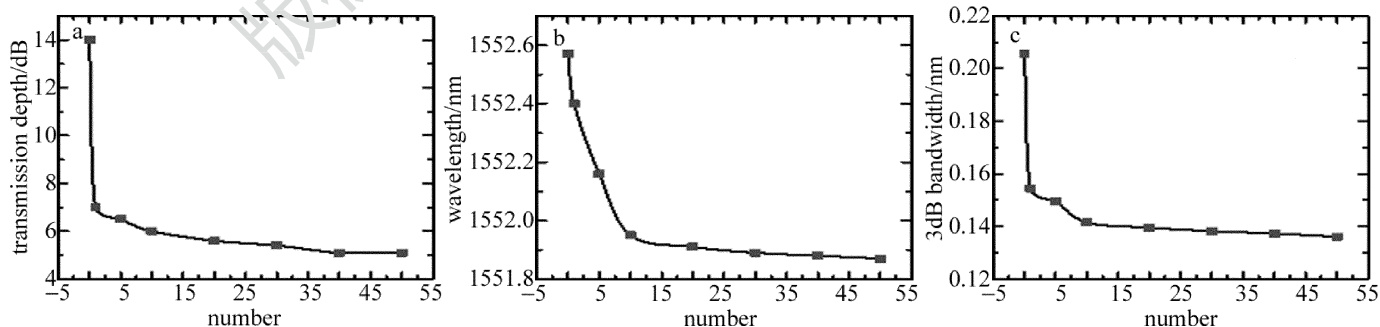


Fig. 3 The changing trend of 14dB-FBG parameters under different discharging times

退火前后,光栅光谱特性一致。该现象表明以一定放电功率的电弧等离子体,多次扫描栅区可实现 FBG 的退火。然而,此时 14dB-FBG 的透射谱深度仅为 5dB,影响了光纤光栅的反射率。为了提高电弧等离子体退火 FBG 的透射谱深度,采用初始透射谱深度

更大的 FBG 进行实验。

电弧等离子体放电功率依然为固定值 55mW,以同样的速度和方法对透射谱深度 23dB,中心波长 1552.09nm,3dB 带宽 0.2784nm,栅区长度 10mm 的光纤光栅栅区进行放电扫描。光纤光栅标记为 23dB-

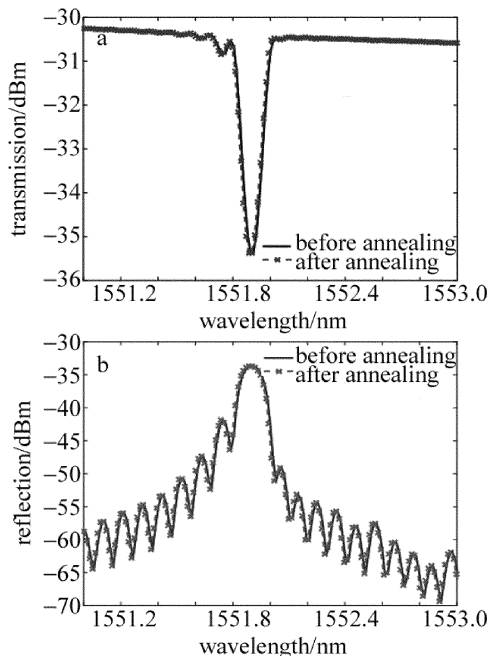


Fig. 4 a—transmission of 14dB-FBG before and after annealing b—reflection of 14dB-FBG before and after annealing

FBG。随着实验次数的增加,其透射谱变化情况以及透射谱深度、中心波长、3dB 带宽的变化趋势分别如图 5 和图 6 所示。

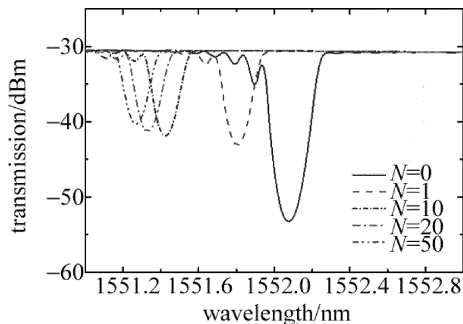


Fig. 5 Transmission spectrum of 23dB-FBG under different discharging times

从图中可以看到,随着实验次数的增加,23dB-FBG 透射谱深度、中心波长、3dB 带宽变化逐渐平缓,最终保持不变,达到饱和。实验结果与 14dB-FBG 一致。饱和状态下的 23dB-FBG 透射谱深度 10dB,中心波长 1551.25nm 3dB 带宽 0.1771nm。透射谱深度大

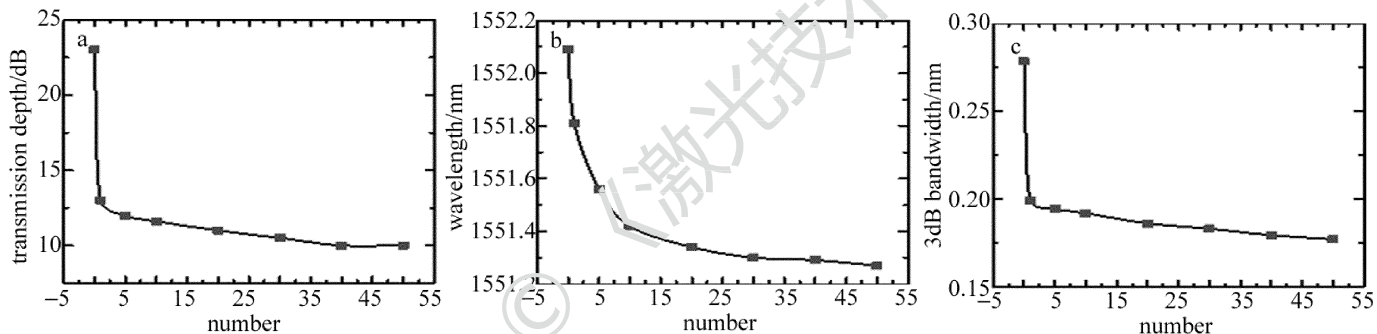


Fig. 6 The changing trend of 23dB-FBG parameters under different discharging times

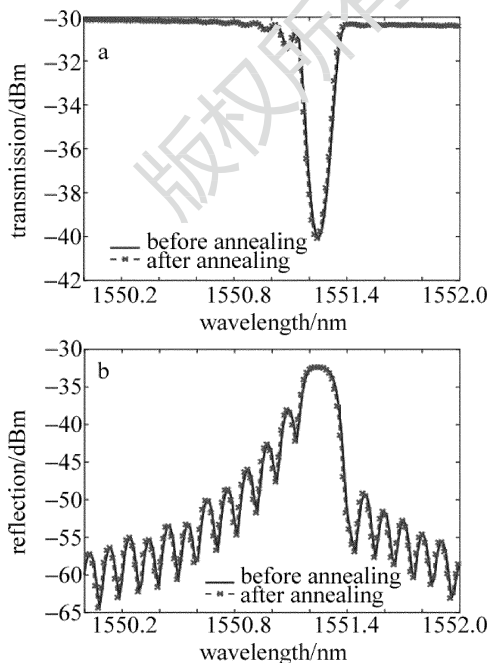


Fig. 7 Comparison of 23dB-FBG

于 14dB-FBG 饱和状态下的 5dB。

对比退火前与退火后的透射谱与反射谱,如图 7 所示,光栅光谱特性一致。说明经电弧等离子体多次放电扫描后,23dB-FBG 实现了完全退火且此时仍旧具有较大的透射谱深度。

3 结 论

将高温电弧等离子体用于 FBG 的退火处理,研究了经电弧等离子体热处理后 FBG 的光谱特性。实验发现,单次放电扫描的情况下,较高的电弧等离子体放电功率使得光栅透射谱深度在退火后保持不变,但中心波长较之于退火前仍发生了蓝移。该现象表明,单次放电扫描并未实现 FBG 的完全退火。保证一定的放电功率,增加放电扫描次数,光纤光栅透射谱深度、3dB 带宽趋于稳定,中心波长不再漂移,最终保持不变。现象与高温退火现象一致。将电弧等离子体处理后的光栅放入高温炉中进行退火,退火前后,光栅光谱特性不变,进一步说明了该方法实现了 FBG 的退火。

本文中研究为紫外激光刻写 FBG 的退火提供了一种新方法,并且具有周期短、对光纤涂覆层无损伤的优点。文中主要研究了电弧等离子体放电功率和扫描次数对光纤光栅光谱特性的影响,至于电弧等离子体放电的其它参量给光纤光栅光谱特性带来的影响,仍需进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] WANG Y P, TANG J, YIN G L, *et al.* The fabrication method and sensing application of fiber grating[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(5):809-819(in Chinese).
- [2] XU H F, YANG Zh Ch, LIU Sh Ch, *et al.* Application of fiber Bragg grating sensing technology in bridge piles[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2012, 23(1):52-56(in Chinese).
- [3] COELHO L, VIEGAS D, SANTOS J L, *et al.* Optical sensor based on hybrid FBG/titanium dioxide coated LPFG for monitoring organic solvents in edible oils[J]. *Talanta*, 2016, 148(1):170-176.
- [4] WANG Ch, NI J Sh, WANG J Q, *et al.* All-fiber velocity sensors applied in wind power generation and their fabrication process[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5):689-692(in Chinese).
- [5] LIU Sh Zh, ZHANG X, ZHENG X, *et al.* Application of distributed fiber Bragg grating sensor system in reactor coating layer[J]. *Yunnan Electric Power*, 2016, 44(1):87-89(in Chinese).
- [6] YU H Y, QIN X H, LIU Y D, *et al.* High-precision FBG sensor for human body temperature detection[J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(4):33-35 (in Chinese).
- [7] LIU Y Y, JIANG F X, HOU J P, *et al.* Research of inscription technique for multi-wavelength array fiber gratings in ribbon fiber[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(4):484-487 (in Chinese).
- [8] ZHONG X Y, WANG Y P, QU J L, *et al.* High-sensitivity strain sensor based on inflated long period fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(18):5463-5466.
- [9] WILLIAMS R J, KRÄMER R G, NOLTE S, *et al.* Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11):1918-1920.
- [10] GUO J C, YU Y S, XUE Y, *et al.* Compact long-period fiber gratings based on periodic microchannels[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(2):111-114.
- [11] NOORDEGRAAF D, SCOLARI L, LAGSAARD J, *et al.* Electrically and mechanically induced long period gratings in liquid crystal photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(13):7901-7912.
- [12] LEMAIRE P J, ATKINS R M, MIZRAHI V, *et al.* High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(13):1191-1193.
- [13] NOGUCHI K, EUSUGI N, NECISARI Y. Loss increase for optical fibers exposed to hydrogen atmosphere[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(2):236-245.
- [14] ATKINS R M, LEMAIRE P J, ERDOGAN T, *et al.* Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(14):1234-1235.
- [15] LI J Zh, HANG D Sh. Hydrogen loading and fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Material Research*, 2006, 20(5):517-522 (in Chinese).
- [16] LI Y, ZHAO H, ZHU Ch, *et al.* Study on fiber gratings technology [J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(s1):749-754(in Chinese).
- [17] RISBEE D L. Splicing silica fibers with an electric arc[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(3):796-798.
- [18] REGO G. Fibre optic devices produced by arc discharges[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(11):113002.
- [19] ZHENG W N, ZHU L Q, ZHUNG W, *et al.* Influence of electrode discharge on fiber Bragg grating spectral characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7):0706003(in Chinese).