

# 基于电弧放电的相移光纤布拉格光栅制作技术

刘学静<sup>1</sup> 杨远洪<sup>1</sup> 张晓哲<sup>1</sup> 靳伟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院光电工程系, 北京 100191)

<sup>2</sup> 香港理工大学电机工程系, 香港

**摘要** 发现并验证了电弧放电对光栅折射率调制的电弧放电擦除(ADE)效应,利用 ADE 效应成功制作了相移光纤光栅。基于 ADE 效应的特点,建立了由这种工艺制作相移光纤光栅的理论模型,基于放电对折射率和光栅擦除长度的影响,采用不同的光栅参数,进行了较全面的仿真研究;同时,设计制作了专用的装置,对基于 ADE 的相移光栅制作技术进行了全面的实验研究和验证,研究了外部应力、放电参数、光栅参数和退火处理等因素对透射峰值波长、线宽和强度的影响。理论仿真与实验研究结果一致。仿真和实验研究均表明:基于 ADE 的相移光纤光栅制作技术方便有效,通过优化放电参数和光栅参数,可以制作高质量的相移光栅。

**关键词** 光纤光学;相移光纤布拉格光栅;传输矩阵;电弧放电擦除

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0505002

## Fabrication Technology of Phase Shifted Fiber Bragg Grating with an Arc Discharge Technique

Liu Xuejing<sup>1</sup> Yang Yuanhong<sup>1</sup> Zhang Xiaozhe<sup>1</sup> Jin Wei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Opto-Electronics Engineering, School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

**Abstract** Electric arc discharge erasing (ADE) effect, which can erase the refractive index modulation in fiber Bragg gratings (FBGs), is demonstrated. Based on ADE technique, the phase-shifted fiber Bragg grating (PSFBG) is fabricated successfully. According to the characteristics of the ADE effect, the theoretical model of PSFBGs produced by this process is built, based on the changes of FBG refractive index and erased length by arc discharges. A comprehensive simulation study is conducted under different FBG parameters. The specific fabrication setup is designed, and the fabrication technique of PSFBG based ADE is studied experimentally. The evolution of the PSFBGs' main parameters, including the wavelength, the intensity and the bandwidth of transmission peak, is investigated experimentally under various conditions, which include changes of the strain, the parameters of electric arc discharge, the properties of the FBGs and annealing treatment factors. The theoretical simulation and experimental study are consistent. It is shown that the PSFBG fabrication technique based on ADE is convenient and effective, and high-quality PSFBG can be produced by optimizing the parameters of arc discharges and FBGs.

**Key words** fiber optics; phase-shifted fiber Bragg grating; transfer matrix; arc discharge erasing

**OCIS codes** 050.2770; 050.5080; 060.2340

## 1 引 言

相移光纤布拉格光栅(PSFBG)是一种非均匀光纤布拉格光栅(FBG),它是在均匀光纤光栅轴向折射率调制中引入突变或者不连续的相移点而形成的特殊光栅<sup>[1]</sup>。这种光栅的透射谱阻带中会出现一

个或者多个线宽极窄的透射窗口。因此,PSFBG可作为窄带滤波器用于光纤激光器中<sup>[2]</sup>,也适用于应力<sup>[3,4]</sup>、压力<sup>[5]</sup>、横向负载<sup>[6]</sup>等传感参量的高精度测量。针对 PSFBG 的制作技术,国内外学者进行了大量的研究。其中,相移相位掩模板法<sup>[7]</sup>利用带有

**收稿日期:** 2012-12-10; **收到修改稿日期:** 2013-01-20

**作者简介:** 刘学静(1988—),女,博士研究生,主要从事相移光栅技术方面的研究。E-mail: liuxj723@yeah.net

**导师简介:** 杨远洪(1969—),男,博士,教授,主要从事光纤传感与光纤器件等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(中国光学学会会员号:S040420656S)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

相移的相位掩模板直接刻写 PSFBG,该方法简单快速但模板昂贵且相移量固定;此外,利用普通相位模板并精确控制模板与光纤的位置,也可实现 PSFBG 的制作,如移动光纤/模板法<sup>[8,9]</sup>、移动光纤法<sup>[10]</sup>、抖动法<sup>[11]</sup>、双光束干涉移动光纤法<sup>[12]</sup>,这种方法透射峰值波长可调且操作灵活;还有一些方法如摩尔光栅法<sup>[13]</sup>、二次曝光法<sup>[14]</sup>也是比较灵活的 PSFBG 制作技术。

在光纤技术中,电弧放电(EAD)广泛应用于光纤熔接<sup>[15]</sup>、长周期光栅制作<sup>[16]</sup>和均匀光栅的切趾处理<sup>[17]</sup>等,可有效实现光纤中折射率的调制。反之,电弧放电也能擦除均匀光栅的折射率调制而引入调制相位的突变。基于这个思路,本文发现并验证了电弧放电对光纤光栅折射率调制的擦除效应,通过电弧放电擦除(ADE)效应局部擦除均匀光栅折射率调制,成功制作出 PSFBG。建立了由这种工艺制作相移光纤光栅的理论模型和专用实验装置,进行了仿真模拟和实验研究,研究了放电参数、纵向应力、均匀光栅参数等对 PSFBG 光谱性能的影响,实现了对 PSFBG 光谱参数的控制,获得了一种方便、实用的 PSFBG 制作技术。

## 2 基于电弧放电折射率调制擦除效应的 PSFBG 原理

### 2.1 基于电弧放电的折射率调制擦除效应

为了验证 ADE 效应,建立了如图 1 所示的实验装置。利用光纤熔接机(Ericsson FSU975)实现对均匀光纤光栅的电弧放电处理;使用扫描激光器(Santec ECL-210)、光功率计(ILX Lightwave FPM-8210)和耦合器等实现光纤光栅透射和反射谱的实时监测,其中扫描激光器波长精度为 1 pm。

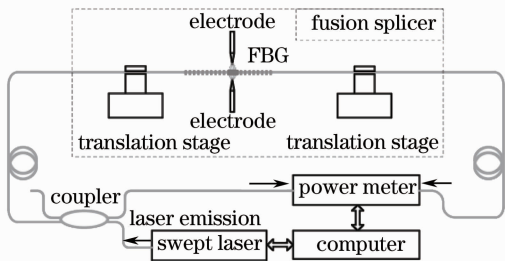


图 1 电弧放电擦除效应实验装置图

Fig. 1 Arc discharge erasing effect experimental setup

实验所用光栅由紫外光束扫描-相位掩模板法刻写,均匀栅区长度为 0.2 mm,其放电前后的透射谱和反射谱如图 2、3 中黑色曲线所示。将光栅安装在

在熔接机光纤支架上,精确调节保证光栅的中心位置对准放电电极。为了得到合适的放电参数(放电电流、电弧持续时间),多次实验,最终确定放电电流为 8 mA、电弧持续时间为 0.2 s。如图 2、3 中红色曲线所示,一次放电后光栅反射峰和透射谷消失,表明 ADE 效应可以擦除光栅中的折射率调制。改变均匀光栅长度,进行了多次重复实验。实验显示,随着光栅长度的增加,完全擦除折射率调制所需的放电次数增多。而且存在一个最大长度,当光栅大于这个长度时,不论如何增加放电次数,都不能使反射峰和透射谷消失,这由熔接机放电区域决定<sup>[15]</sup>。基于采用的熔接机条件,这个最大长度约为 1 mm。尽管这个长度较短,但已足够产生需要的任意相移。

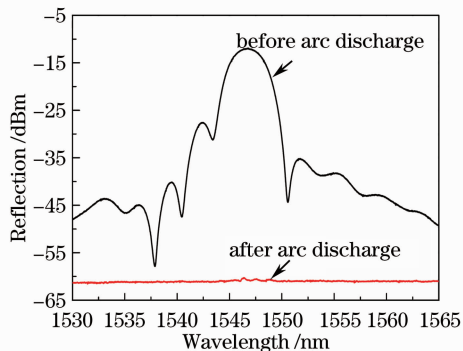


图 2 放电前后 0.2 mm 均匀 FBG 的反射光谱  
Fig. 2 Reflection spectra of the 0.2 mm long uniform FBG before and after EAD

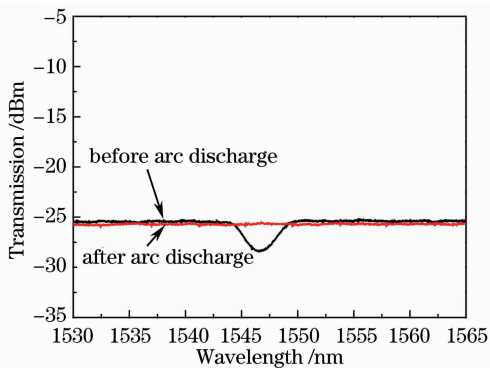


图 3 放电前后 0.2 mm 均匀 FBG 的透射光谱  
Fig. 3 Transmission spectra of the 0.2 mm long uniform FBG before and after EAD

### 2.2 基于 ADE 效应的 PSFBG 模型及仿真

在一般情况下,光纤光栅局部折射率擦除后会形成一段折射率均匀分布区域,如图 4 所示。这个折射率均匀分布区域可等效为相移区,其长度为  $L_{\phi}$ ,等效折射率为  $n_{\text{eff}}$ 。根据相移光纤光栅理论,当波长为  $\lambda_B$  的光通过此段光纤时,光的相位变化为

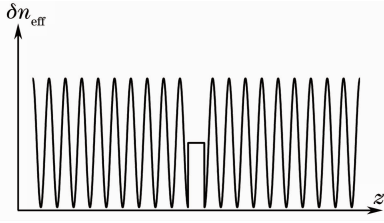


图4 基于 ADE 效应的 PSFBG 折射率调制分布示意图  
Fig. 4 Index modulation of PSFBG based on the ADE effect

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_B} \cdot n_{\text{eff}} L_\phi. \quad (1)$$

采用传输矩阵法<sup>[18]</sup>,将 PSFBG 均匀分成  $F_a$ 、 $F_\phi$  和  $F_b$  三段,其中  $F_\phi$  为长为  $L_\phi$  的相移区, $F_a$ 、 $F_b$  为均匀栅区。每段由  $2 \times 2$  传输矩阵表征光在该区域的传输特性,将各段矩阵相乘就得到了整个 PSFBG 的传输矩阵  $F$ 。

设左右两段均匀栅区的传输矩阵为  $F_i$ ,可表示为

$$F_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $i = a, b$ ;  $\Delta z$  表示每段均匀光栅的长度;系数  $\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}}$ ,  $\kappa$  和  $\hat{\sigma}$  分别表示交流耦合系数和直流耦合系数。

设相移光栅的相移量为  $\phi$ ,相移区  $F_\phi$  的传输矩阵可表示为

$$F_\phi = \begin{bmatrix} -\exp(-i\phi/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi/2) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据文献[18]可推导出 PSFBG 的透射率为

$$T = |R_M/R_0|^2 = \left| \frac{F_{11} \cdot F_{22} - F_{12} \cdot F_{21}}{F_{22}} \right|^2, \quad (6)$$

式中  $F_{11}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{21}$ 、 $F_{22}$  分别为  $2 \times 2$  传输矩阵  $F$  的各项分量, $R_0$  和  $R_M$  分别为 PSFBG 输入端的前向光和输出端的后向光。

实际的 FBG 参数一般为:等效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.46$ ,折射率调制强度  $\Delta n = 0.0001$ ,折射率调制周期为 530.8 nm。光栅经过局部放电后,放电区域折射率调制会被擦除,等效折射率一般会变小<sup>[19]</sup>,而且随着放电强度或次数的增加,擦除区域的长度会变长。基于这些特点,利用上述模型,改变相移区长度和等效折射率,进行了仿真研究。设相移位置在光栅中心,栅区长为  $L$ ,相移区长为  $L_\phi$ 。固定  $L_\phi$  为 0.5 mm, $n_{\text{eff}}$  分别为 1.46、1.459、1.458、1.457、1.456 时,PSFBG 透射谱如图 5 所示,随着等效折射率的降低,透射峰值波长由长波向短波方向移动。固定  $n_{\text{eff}}$  不变, $L_\phi$  分别取 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mm 时,PSFBG 透射谱如图 6 所示,随着  $L_\phi$  的增加,透射峰值波长由短波向长波方向移动。

实际情况下,放电位置可能偏离光栅中心位置,而且所用 FBG 的折射率调制强度、光栅的长度等都会影响制作的 PSFBG 的特性,因而需要进行仿真研

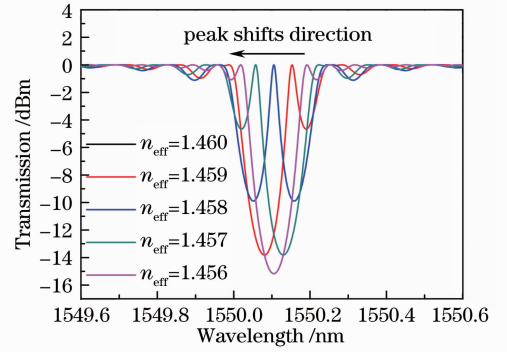


图5 相移区等效折射率不同时对应的 PSFBG 透射谱  
Fig. 5 PSFBG transmission spectra under different effective indices in phase shift region

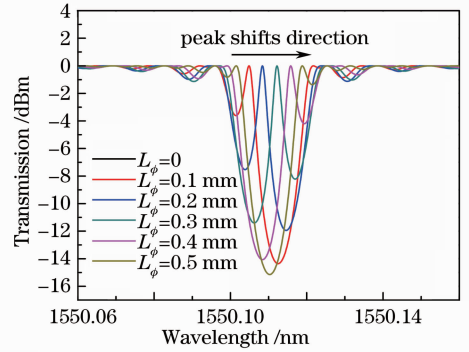


图6 相移区长度  $L_\phi$  不同时对应的 PSFBG 透射谱  
Fig. 6 PSFBG transmission spectra under different  $L_\phi$  究。固定 PSFBG 相移量为  $\pi$ ,放电位置偏离光栅中心的偏移量  $\Delta L$  分别为 0、1、2 mm,计算得到的 PSFBG 透射谱如图 7 所示,其中随  $\Delta L$  增大透射峰强度逐渐减小,没有偏移时,达到最大值。设 PSFBG 相移位于栅区中心,且  $\phi = \pi$ ,折射率调制强度  $\Delta n$  分别为 0.00011、0.00013、0.00015 时,PSFBG 透射谱如图 8 所示,透射峰线宽随  $\Delta n$  增加逐渐减小。固定  $\Delta n =$

0.0001, 设栅区长度  $L$  分别为 11、12、13 mm 时, PSFBG 透射谱如图 9 所示, 相移峰线宽随  $L$  增加逐渐减小。

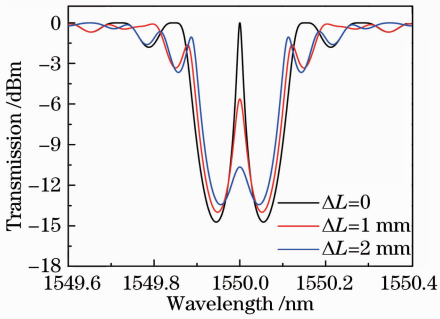


图 7 不同相移位置对应的 PSFBG 透射谱

Fig. 7 PSFBG transmission spectra under different phase shift positions

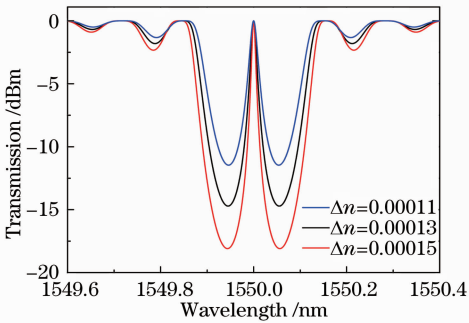


图 8 不同调制深度对应的 PSFBG 透射谱

Fig. 8 PSFBG transmission spectra under different modulation depths

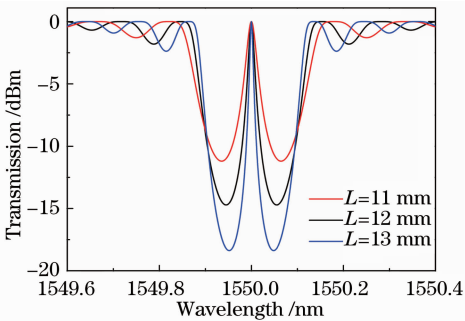


图 9 不同光栅长度对应的 PSFBG 透射谱

Fig. 9 PSFBG transmission spectra under different FBG lengths

### 3 基于 ADE 效应的 PSFBG 制作技术

基于 ADE 效应, 设计了如图 10 所示的刻写装置。在图 1 所示装置的基础上, 加入调节平台, 熔接机放置在调节平台中心。调节平台由光学面包板、一对 L 型支架、一对带有 V 型槽的滑轮和一对二维位移控制装置组成。光学面包板两端对称固定有 L

型支架, 支架上分别安装二维位移控制装置, 装置与熔接机光纤支架等高。装置上的两个旋钮分别控制光纤在  $x$  和  $y$  方向上的精确位置。为了调节光栅在  $z$  轴的位置, 每个二维位移控制装置上还安装了带有 V 型槽的滑轮。在该装置中, 利用熔接机光纤支架, 可以将光栅自由安装在放电电极间; 也可以在光纤两端对称附加一定重物, 沿光纤轴向施加一定应力, 再通过调节平台控制光栅位置。

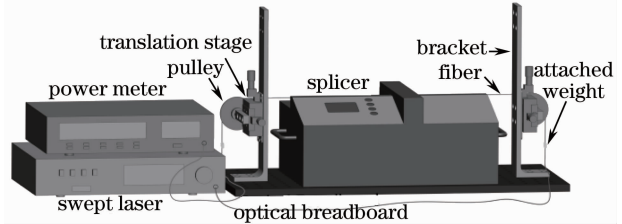


图 10 PSFBG 制作装置

Fig. 10 PSFBG fabrication system

在图 10 所示装置上刻写 PSFBG 时, 首先进行基于 ADE 效应的 PSFBG 制作实验, 所用光栅为栅区长 12 mm 的均匀光栅, 精确调节栅区相对放电电极位置, 使放电点位于光栅中部。设置放电电流为 8 mA, 电弧持续时间为 0.2 s。实验中, 经过一次放电便使光栅传输谱阻带出现透射峰。经过约 8 次放电, 形成了  $\pi$ -PSFBG, 放电前后的透射谱如图 11 所示, 中心透射峰值波长为 1550.09 nm, 强度为 -17.5 dBm, 线宽为 16 pm。为了研究基于 ADE 效应的 PSFBG 制作技术和工艺, 通过大量实验进一步研究了电弧放电参数、安装应力以及均匀光栅参数对 PSFBG 透射峰值波长、线宽以及强度的影响。

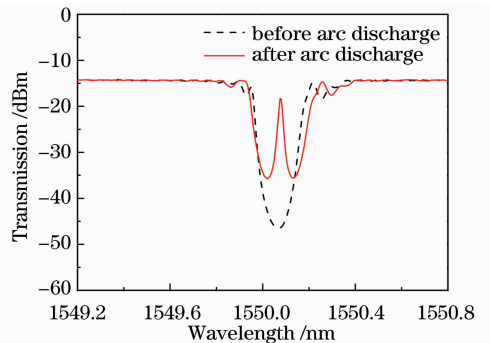


图 11 放电前后 PSFBG 透射谱

Fig. 11 PSFBG transmission spectra before and after EAD

#### 3.1 电弧放电对 PSFBG 透射峰值波长的影响

现有 PSFBG 制作技术都是通过调节相移区长度  $L_\phi$  来实现对相移量的控制的, 由于光栅的周期很小, 需要精度很高的位移控制装置才能精确控制相

移量。但电弧放电可以通过同时改变折射率和擦除区长度控制相移量,来获得更高的效率和更好的灵活性。电弧放电会使纤芯等效折射率  $n_{\text{eff}}$  降低<sup>[19]</sup>,引起相移量变化;若给光纤光栅纵向施加一定应力,在放电时,相移区长度就会发生变化,这也是引起相移量变化的因素之一。

为了研究折射率改变对相移量的影响,首先研究了光栅无应力安装时相移的变化规律。实验采用 12 mm 的均匀光栅,选择放电电流为 8.5 mA,电弧持续时间为 0.2 s。首次放电处理后,在光栅透射谱阻带右侧首先出现透射峰,继续增加放电次数发现透射峰值波长逐渐向短波方向移动。放电过程中,典型的透射谱中峰值移动如图 12 所示,透射峰值波长的变化如图 13 所示。透射峰值波长随电弧放电非线性减小,服从指数衰减。分别将放电电流设置为 9 mA 和 9.5 mA,进行相同的实验。透射峰值波长如图 13 所示,变化趋势相同。电弧放电除了擦除光栅局部的折射率调制外,还会使该位置的等效折射率变小,与文献[19]的相关结论一致。随着放电次数的增加,透射峰值波长从长波向短波方向移动,与图 5 所示的仿真结果吻合。

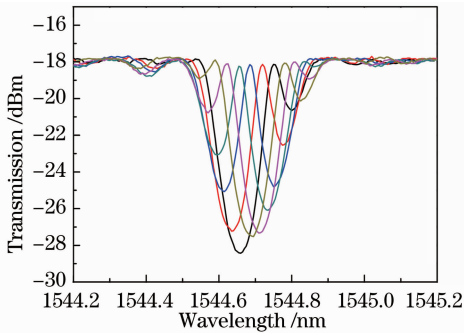


图 12 多次放电引入不同相移所对应的 PSFBG 透射光谱  
Fig. 12 Transmission spectra of the PSFBGs with different phase shifts induced by multiple arc discharges

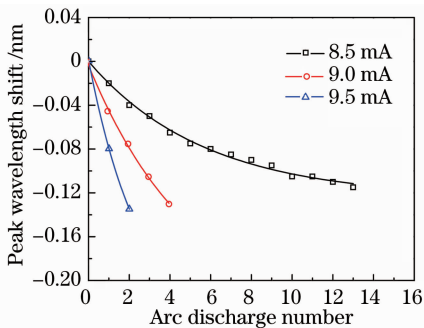


图 13 光纤采用无应力安装方式时透射峰值波长变化  
Fig. 13 Peak wavelength shifts under the stressless mounting condition

利用图 10 所示装置,在均匀光栅两端尾纤分别附加 3.2 g 重物。设置放电电流分别为 8.5、9、9.5 mA,电弧持续时间为 0.2 s,进行了重复放电实验。放电过程中,典型的透射谱中峰值移动与图 12 相似,但波长移动方向相反,即透射峰首先在原透射谱阻带的左侧出现,随着放电次数的增加,峰值波长向长波方向移动,与图 6 所示的仿真结果一致。峰值波长随电弧放电变化规律如图 14 所示,按指数规律增长。结合(1)式可以看出,在沿光纤轴向加入拉应力时,相移区长度  $L_{\phi}$  的变化成为相移变化的主要因素。因此在一定放电条件下,调节对光栅施加的应力可以控制每次放电后相移量的变化值,从而实现 PSFBG 相移的精确控制。

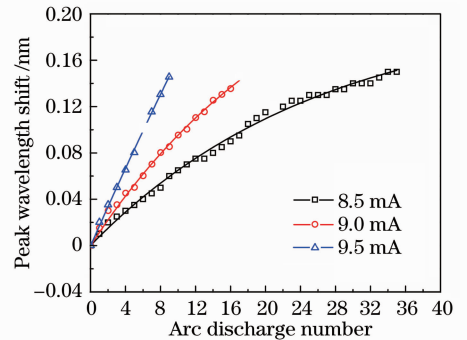


图 14 光纤采用应力安装方式时透射峰值波长变化(重物 3.2 g)

Fig. 14 Peak wavelength shifts under stressed mounting condition (3.2 g weight)

### 3.2 放电位置对 PSFBG 透射峰值强度的影响

为了确定放电位置对 PSFBG 透射峰值强度的影响,基于 ADE 效应,改变放电位置,测量了 PSFBG 的透射峰值强度变化。实验中采用 3 只参数相同的均匀光栅,选择不同的放电位置制作出 3 只  $\pi$ -PSFBG。其中,放电位置相对栅区中心距离  $\Delta L$  分别为 0、1、2 mm。实验结果如图 15 所示,3 只

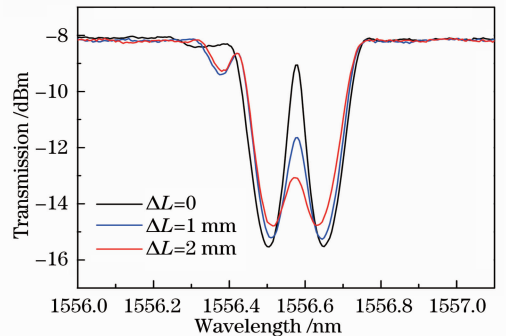


图 15 不同放电位置对应的透射光谱  
Fig. 15 Transmission spectra under different arc discharge positions

$\pi$ -PSFBG 的透射峰强度分别为  $-9.06$  dBm、 $-11.64$  dBm 和  $-13.07$  dBm。实验研究表明,透射峰强度随  $\Delta L$  增加而减小,只有当放电位置在栅区中心时透射峰值强度最大,验证了图 7 所示的仿真结果。

### 3.3 光栅长度和调制深度对 PSFBG 透射峰线宽的影响

实验进一步优化了光栅长度和折射率调制深度。研究了光栅长度对透射峰线宽的影响。采用 ADE 技术,用参数相同,长度分别为 11、12、13 mm 的均匀光栅制作了 3 只  $\pi$ -PSFBG,其透射谱如图 16 所示,光栅越长,透射峰线宽越窄。这是因为光栅越长,相移区域两侧的反射率越大,使透射峰更加细锐。实验又研究了均匀光栅调制深度对透射峰线宽的影响。首先,在曝光时间分别为 10、15、20 min 的条件下刻写了 3 根长度相同的均匀光栅。曝光时间  $\Delta t$  越长,刻写均匀光栅的调制深度  $\Delta n$  越大。再利用 ADE 技术,将这 3 根均匀光栅制作成  $\pi$ -PSFBG,其透射谱如图 17 所示,透射峰线宽随曝光时间的增加而减小,对应 10、15、20 min 的曝光时间,线宽分别为 0.032、0.031、0.027 nm。结果表明,曝光时间越长,调制深度越大,均匀光栅的反射率越大,制作出的 PSFBG 透射峰越细锐。因此利用 ADE 技术制作 PSFBG 时,选用均匀光栅长度越长,调制深度越大,PSFBG 透射峰线宽越窄,与图 8、9 所示仿真结果一致。

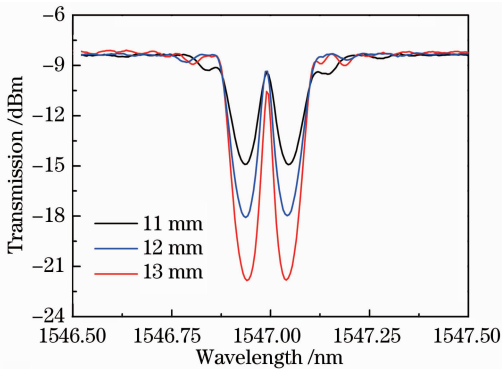


图 16 不同光栅长度对应的透射光谱

Fig. 16 Transmission spectra under different FBG lengths

### 3.4 退火对 PSFBG 稳定性的影响

一般情况下,退火可以提高光纤光栅的稳定性。研究了采用退火和未退火的均匀光栅在相同条件下刻写 PSFBG 的稳定性。结果表明,未退火的 PSFBG 对电弧放电较敏感,透射峰值波长变化较快,但制作的 PSFBG 光谱易产生漂移,稳定性较

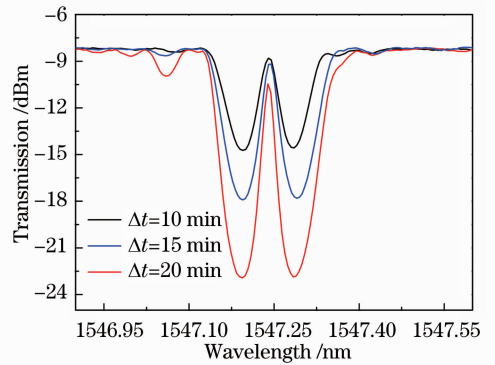


图 17 不同曝光时间对应的透射光谱

Fig. 17 Transmission spectra under different exposure time

差。与此相反,用退火后的光栅制作 PSFBG,对放电作用较不敏感,但制成的 PSFBG 相对稳定。所以,退火后的均匀光栅更适合基于 ADE 工艺的 PSFBG 制作。

## 4 结 论

发现并验证了电弧放电对光纤折射率调制的擦除效应,建立了基于 ADE 效应的 PSFBG 理论模型,对主要参数进行了仿真分析,并利用该效应实现了 PSFBG 的制作。设计了制作 PSFBG 的装置,通过大量实验,研究了放电参数、纵向应力、均匀光栅参数等对 PSFBG 光谱性能的影响。仿真和实验研究表明,优化放电参数和所用均匀光栅参数可实现对 PSFBG 光谱参数的精确控制。基于 ADE 效应的 PSFBG 制作技术与其他 PSFBG 制作方法相比,工艺简单、制作方便,在相移及 PSFBG 的参数控制方面具有独特的优势。这种方便、实用的 PSFBG 制作技术,将推动 PSFBG 在光纤传感、激光和滤波等领域的广泛应用。

## 参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal, S. Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8): 995~997
- 2 G. Tremblay, Y. Shen. Effects of the phase shift split on distributed-feedback (FDB) fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2006, **6343**: 634343
- 3 Bi Weihong, Li Wei, Fu Guangwei. Simultaneous measurement of strain and temperature with a fiber Bragg grating sensor array [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(8): 827~834
- 4 毕卫红, 李 卫, 傅广为. 分布式光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(8): 827~834
- 4 M. LeBlanc, A. D. Kersey, T. E. Tsai. Sub-nanostrain strain measurements using a pi-phase shifted grating [C]. *OFS*, 1997. OTuB4
- 5 D. Gatti, G. Galzerano, D. Janner *et al.*. Fiber strain sensor based on a  $\pi$ -phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-

- Hall technique[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1945~1950
- 6 E. Chehura, S. W. James, N. Lawson *et al.*. Pressure measurements on aircraft wing using phase-shifted fibre Bragg grating sensors[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 750334
- 7 R. Kashyap, P. F. Mckee, D. Armes. UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibres using phase-shifted phase masks [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30** (23): 1977~1978
- 8 M. J. Cole, W. H. Loh, R. I. Laming *et al.*. Moving fibre/phase mask-scanning beam technique for enhanced flexibility in producing fibre gratings with uniform phase mask[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17): 1488~1490
- 9 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Ni Jiasheng *et al.*. Comparison study on  $\pi$  phase-shifted FBG's fabrication methods[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s105002  
宋志强, 祁海峰, 倪家升等.  $\pi$ 相移光纤光栅制作方法的比较研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s1): s105002
- 10 Xueming Liu. A novel dual-wavelength DFB fiber laser based on symmetrical FBG structure[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(9): 632~634
- 11 L. Poladian, B. Ashton, W. E. Padden *et al.*. Characterisation of phase-shifts in gratings fabricated by over-dithering and simple displacement [J]. *Optic Fiber Technology*, 2003, **9** (4): 173~188
- 12 E. Chehura, S. W. James, R. P. Tatam. A simple and wavelength-flexible procedure for fabricating phase-shifted fibre Bragg gratings[J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, **21**(9): 1~7
- 13 D. C. J. Reid, C. M. Ragdale, I. Bennion *et al.*. Phase-shifted Moiré grating fibre resonators [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(1): 10~12
- 14 J. Canning, M. G. Sceats.  $\pi$ -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibers by UV post-processing[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(16): 1344~1345
- 15 Y. Kato, S. Seikai, M. Tateda. Arc-fusion splicing of single-mode fiber. 1: Optimum splice conditions [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(7): 1332~1336
- 16 G. Rego, P. V. S. Marques, J. L. Santos *et al.*. Arc-induced long-period gratings [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2005, **24**(3): 245~259
- 17 G. Rego, R. Romero, O. Frazao *et al.*. Apodisation of uniform fibre Bragg gratings using electric arc discharges[C]. Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop on Fibre and Optical Passive Components, 2002. 13~16
- 18 Makoto Ymada, Kyohei Sakuda. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(16): 3474~3478
- 19 K. Morishita, S. F. Yuan, Y. Miyake. Refractive-index changes and long-period fiber gratings made by rapid solidification [C]. Proceedings of 2002 IEEE/LEOS Workshop on Fibre and Optical Passive Components, 2002. 98~103

栏目编辑：王晓琰