

文章编号: 0258-7025(2010)06-1473-08

# 非对称双侧曝光技术实现长周期光纤光栅 传感特性的调整与控制方法

王雪 杨军 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 研究了采用非对称双侧曝光技术实现长周期光纤光栅(LPFG)的传感特性的调整方法。非对称热应力作用的理论分析结果表明,先后两次热应力作用的角度差的不同,将导致长周期光纤光栅谐振峰向长波或短波方向漂移。实验结果与理论分析结果一致,得出了长周期光纤光栅谐振波长漂移方向随方位角度差的变化规律。这一特性可用于谐振波长可调的长周期光纤光栅的制作,也可用于构造光纤传感应用系统。

**关键词** 传感器;长周期光纤光栅;非对称曝光;热应力;CO<sub>2</sub> 激光

**中图分类号** TN253;TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1473

## Bi-Direction Asymmetric Laser Pulses Exposure Approach for Control and Improving the LPFG Sensing Characteristics

Wang Xue Yang Jun Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** By using bi-direction of the fiber cross-section asymmetric CO<sub>2</sub> laser pulses exposure approach, the long period fiber grating (LPFG) sensing characteristics can be controlled and improved. This fabrication method is to write the LPFG on one side by CO<sub>2</sub> laser, and then write the LPFG again on the other side with the same grating pitch and exposure energy. Under the action of the two exposure directions, the fiber refractive index was periodically modulated twice. Asymmetric thermal stress analysis results shown that the resonant peak of LPFG can shift in direction of either shorter or longer wavelengths, depending on the angle difference  $\Delta\theta$  between two exposure directions changes in the second writing process. It is confirmed by the experimental results. We found this technique could be used in wavelength tunable LPFG fabrication or fiber optic sensors design to control and improve the characteristics of the components.

**Key words** sensors; long period fiber grating; asymmetric exposures; thermal stress; CO<sub>2</sub> laser

### 1 引言

近年来,长周期光纤光栅(LPFG)在光纤通信和光纤传感领域中具有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>,同时 CO<sub>2</sub> 激光制作长周期光纤光栅的原理受到越来越多的关注。残余应力的释放被认为是成栅原理之一<sup>[3,4]</sup>。Kim 等<sup>[5]</sup>研究了用非聚焦的 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入方

法时,分析了不同拉力控制的光纤中残余应力的释放规律。Park 等<sup>[6]</sup>分析了纤芯和包层内残余应力的情况并利用光弹效应测量了其分布<sup>[7]</sup>。然而,采用 CO<sub>2</sub> 激光单侧曝光方法制作长周期光纤光栅会导致光纤横截面折射率分布的不均匀,从而带来较大的偏振相关损耗(PDL)。为了克服这种缺点,一

收稿日期: 2010-03-11; 收到修改稿日期: 2010-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(60877046,60707013,60807032)资助课题。

作者简介: 王雪(1981—),女,博士研究生,主要从事光纤传感技术及应用方面的研究。

E-mail: wangxue0325@126.com

导师简介: 苑立波(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传输理论、光纤器件、光纤传感技术及应用等方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com(中国光学学会会员号:S040421085S)

些学者提出了采用旋转曝光技术<sup>[8]</sup>和轴对称制作技术<sup>[9]</sup>来制作长周期光纤光栅,通过在光纤圆周横截面几个对称的位置同时曝光来实现光纤横截面折射率的均匀分布。如果采用在光纤圆周任意两个方向先后对光纤进行曝光的制作方法,是否会对长周期光纤光栅的透射谱造成影响?可否通过非对称 CO<sub>2</sub> 激光曝光热应力所导致的非均匀残余应力来实现长周期光纤光栅传感特性的调整与控制?为此,本文研究了 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在不同曝光方向写入 LPFG 的过程中光栅的透射谱特性和透射谱的演变规律,并进一步给出了对应的长周期光纤光栅传感特性变化的情况。

## 2 理论分析

长周期光纤光栅的模式耦合主要发生在纤芯导模 LP<sub>01</sub>和同向传输的包层模 LP<sub>0m</sub>之间,根据耦合模理论,长周期光纤光栅耦合模式的谐振条件可表示为<sup>[10]</sup>

$$\lambda_{\text{res0}}^m = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda, \quad (1)$$

式中  $\lambda_{\text{res0}}^m$  为初始谐振波长,  $\Lambda$  为光栅周期,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$  分别为纤芯导模和第  $m$  次包层模的有效折射率。在长周期光纤光栅写入过程中,谐振波长  $\lambda_{\text{res}}^m$  可表示为<sup>[10]</sup>

$$\lambda_{\text{res}}^m = \lambda_{\text{res0}}^m \left[ 1 + \frac{(\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})(d\lambda_{\text{res0}}^m/d\Lambda)}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})^2} \right], \quad (2)$$

式中  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$  分别为纤芯导模和包层模平均有效折射率的变化。由(2)式可知,在长周期光纤光栅的写入过程中,随着光纤中纤芯和包层的有效折射率调制增加,光栅的谐振波长  $\lambda_{\text{res}}^m$  将会发生漂移,而漂移的方向则与包层模的阶次  $m$  有关<sup>[11]</sup>,当  $m \leq 7$  时,谐振峰随着折射率调制的增加向长波方向漂移,当  $m \geq 8$  时,谐振峰则随着折射率调制的增加向短波方向漂移。

对于在光纤圆周任意两个方向上先后对光纤进行曝光的情况,根据上述分析,在首次曝光时谐振波长的漂移方向与光纤有效折射率的变化和包层模的阶次  $m$  有关,而在光纤圆周另一个方向上再次曝光时,两次曝光所产生的应力先后作用于光纤圆周的大小和方向的差异都可能成为影响谐振波长漂移方向的因素。光纤中残余应力的释放是 CO<sub>2</sub> 激光制作长周期光纤光栅的几种可能的机理之一。对于 CO<sub>2</sub> 激光单侧曝光制作的长周期光纤光栅,其应力分布呈现非对称性,因此轴向应力  $\sigma_z$  不能再用简单的加法法则  $\sigma_z = \sigma_r + \sigma_\theta$  来描述。因此,需要定义二

维横向应力张量分量  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{r\theta}$ , 以及轴向应力分量  $\sigma_{zz}$ <sup>[12]</sup>。光纤中残余应力主要由热应力和机械应力的叠加组成,在光纤光栅的制作过程中瞬态热效应是导致残余应力释放的重要原因。由光弹效应,纤芯中的折射率变化主要由残余应力的释放引起,折射率变化与应力的关系为<sup>[13]</sup>

$$\Delta n_r = C_1 \sigma_{rr} + C_2 (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}), \quad (3)$$

$$\Delta n_\theta = C_1 \sigma_{\theta\theta} + C_2 (\sigma_{zz} + \sigma_{rr}), \quad (4)$$

$$\Delta n_z = C_1 \sigma_{zz} + C_2 (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}), \quad (5)$$

式中  $\Delta n_r, \Delta n_\theta$  和  $\Delta n_z$  分别为径向、圆周和轴向折射率的变化;  $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}$  和  $\sigma_{zz}$  分别为纤芯中径向、圆周和轴向的热应力分量;  $C_1$  和  $C_2$  为光弹系数,在 SiO<sub>2</sub> 材料中,  $C_1 = -6.5 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ ,  $C_2 = -4.2 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 。在单模光纤纤芯中有  $\sigma_{zz} \gg \sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}$ , 因此径向折射率变化  $\Delta n_r$  可简单表示为<sup>[14]</sup>

$$\Delta n_r = C_2 \sigma_{zz}. \quad (6)$$

为便于讨论,建立如图 1 所示的坐标系 OXYZ, Z 轴平行于光纤轴。在光纤横截面圆周先后两次曝光的方位角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 它们的差为  $\Delta\theta$ , 且  $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta$ 。光纤中轴向热应力分量  $\sigma_{zz}$  为两侧热应力的叠加,表示为

$$\sigma_{zz}(r, \theta) = \sigma_{zz}(r, \theta_1) + \sigma_{zz}(r, \theta_1 + \Delta\theta). \quad (7)$$

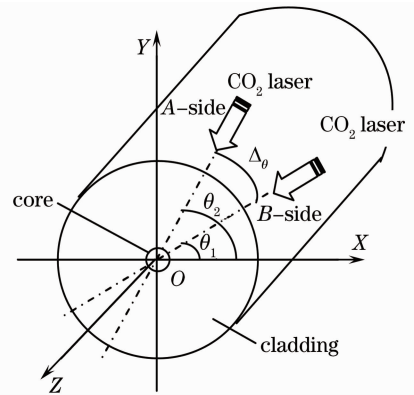


图 1 非对称双侧曝光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of asymmetric exposure

光波在光纤中传播时,光纤中折射率的改变主要是径向折射率变化  $\Delta n_r$ , 也就是长周期光纤光栅中纤芯导模有效折射率的变化,即  $\Delta n_r = \delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 。由于采用 CO<sub>2</sub> 激光脉冲制作长周期光纤光栅,其瞬态局域加热引起残余应力释放所导致纤芯折射率改变为  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ , 由于未形成光栅之前,光波能量主要存在于纤芯波导中,因此,谐振波长漂移的大小和方向主要取决于  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ , 所以  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$  的影响可以忽略。将(6)式代入(1),(2)式中,可以得到谐振波长变化量与光纤中释放的残余应力之间的关系

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{res}}^m - \lambda_{\text{res}0}^m =$$

$$C_2 [\sigma_{zz}(r, \theta_1) + \sigma_{zz}(r, \theta_1 + \Delta\theta)] \frac{\Delta^2}{\lambda_{\text{res}0}^m} \frac{d\lambda_{\text{res}0}^m}{d\Delta}, \quad (8)$$

式中  $\lambda_{\text{res}0}^m$  与  $\Delta$  均为已知量, 将(7)式中两侧的应力均用傅里叶级数展开, 可表示为<sup>[12]</sup>

$$\sigma_{zz} = \sum_n [\sigma_{zzc}^n(r) \cos(n\theta) + \sigma_{zsz}^n(r) \sin(n\theta)], \quad (9)$$

从(8), (9)式可以看出, 谐振波长的变化量与两侧叠加后的应力  $\sigma_{zz}$  成反比,  $\sigma_{zz}$  则因  $\Delta\theta$  取值不同而增大或减小。当  $\text{CO}_2$  激光聚焦照射在光纤横截面圆周的  $B$  侧时, 在  $A$  侧曝光后形成的谐振波长  $\lambda_{\text{res}}$  作为在  $B$  侧的初始谐振波长  $\lambda_{\text{res}0}^m$ , 此时纤芯导模有效折射率将被再次调制, 谐振波长也将再次发生漂移。再次调制可能会对首次曝光引起的折射率调制产生影响, 当  $\Delta\theta$  的取值较小时, 两次曝光方向差别不大, 折射率调制将随着曝光次数的增加不断加强, 而  $\Delta\theta$  的取值较大时则会产生抵消的作用, 所以二次曝光时谐振波长会因  $\Delta\theta$  的取值不同而向长波或短波方向漂移。

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 非对称双侧曝光实验装置

非对称双侧曝光制备长周期光纤光栅的实验装置如图2所示, 待曝光光纤固定在一套精密同轴旋转装置上, 该装置有两个可三维调节的旋转盘分别由步进电机控制, 可以分别实现同步、异步转动, 最小刻度为  $1^\circ$ , 圆盘两侧分别装有一个 V 型槽用来固定光纤。  $\text{CO}_2$  激光器由计算机控制, 全功率为 10 W, 典型的工作频率为 5 kHz。在右侧旋转盘与支架中间悬挂一个 10 g 的砝码以保持光纤处于拉直状态。实验所用的光源为放大的自发辐射(ASE)光源, 其中心波长为 1550 nm, 输出光谱由光谱分析仪(OSA)(AQ6317B)监测。

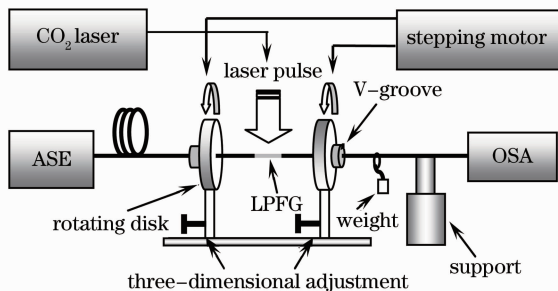


图2 长周期光纤光栅制备装置

Fig. 2 Experimental setup of the LPFG fabrication system

实验中, 首先采用单侧曝光方法在长飞 G. 652 标准单模光纤上写入周期为  $620 \mu\text{m}$ , 周期数 40 的长周期光纤光栅, 然后以从右至左观测, 通过三维光纤同轴旋转控制系统将两个转盘同时旋转  $\Delta\theta$ , 此时光纤也沿轴旋转了  $\Delta\theta$ , 在该圆周方向( $B$  侧)再次对光纤进行周期性地曝光, 写入与旋转前周期和周期数相同的光栅。为了研究相同能量下先后两次写入对光谱的影响, 在制作过程中通常使旋转后曝光的次数与旋转前相等, 以保证两侧曝光的参数和能量一致。

### 3.2 非对称热应力作用对谐振波长和谐振峰幅值的影响

在光纤  $A$  侧曝光制备长周期光纤光栅的过程中, 在观测范围内首先会出现  $2\sim 3$  个凹陷, 随着曝光次数的增加, 光栅的透射谱的损耗峰深度会逐渐增大, 其中一个凹陷会越来越深, 其余的凹陷则慢慢变浅, 本实验所用的  $\text{CO}_2$  激光器通常曝光 20 次左右才能获得  $-25 \text{ dB}$  左右的损耗峰, 而曝光次数越多激光器提供的能量越不稳定, 因此本实验在  $A, B$  两侧曝光次数一般不超过 10 次, 所以在  $1500\sim 1600 \text{ nm}$  范围内通常可以观测到 3 个谐振峰。实验中发现, 在  $A$  侧首次曝光时所形成的光栅的谐振峰随着曝光次数的增加逐渐向长波方向漂移, 根据前面理论分析可知, 此时光纤中的模式耦合是纤芯导模与低次( $m \leq 7$ )包层模之间的耦合, 而在光纤  $B$  侧再次曝光时, 该谐振峰随着曝光次数的增加, 其漂移方向与两次曝光方向的角度差有关。首先选取  $\Delta\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  和  $180^\circ$  这几个典型的角进行实验, 来观察在  $B$  侧写入光栅过程中透射谱的变化情况。图 3(a)~(f) 给出了采用非对称双侧曝光方法以不同照射方位角度差写入长周期光纤光栅的过程中, 在  $B$  侧曝光时透射谱的演变情况。表 1 给出了该过程中谐振波长和谐振峰幅值的大小, 及其在光纤旋转前后的最大变化差值。

从图 3 所示的实验结果可以看出, 在  $B$  侧进行二次曝光时, 曝光的方向和次数都会影响谐振峰的漂移方向和谐振峰幅值的大小。1) 对谐振峰漂移方向的影响:  $\Delta\theta = 30^\circ$  时, 谐振峰随着曝光次数的增加向短波方向漂移;  $\Delta\theta = 60^\circ$  时, 谐振峰随着曝光次数的增加其波长在  $1549 \text{ nm}$  附近浮动, 而  $\Delta\theta = 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ , 和  $180^\circ$  时, 谐振峰则随着曝光次数的增加向长波方向漂移。2) 对谐振峰幅值的影响:  $\Delta\theta = 30^\circ$  时, 谐振峰幅值随着曝光次数的增加而逐渐减小;  $\Delta\theta = 60^\circ$  时, 谐振峰幅值随着曝光次数的增加在

-11 dB 附近浮动;而  $\Delta\theta=90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ , 和  $180^\circ$  时, 谐振峰幅值则随着曝光次数的增加逐渐增加;并且夹角  $\Delta\theta$  的值越大, 谐振峰幅值的变化幅度越大。由于在 A 侧曝光后已形成的谐振峰确定了与纤芯导模耦合的包层模的阶次, 所以在 B 侧再次曝光时, 光栅谐振波长的漂移主要受到二次曝光影响, 二

次曝光时应力的作用加强或减弱首次曝光的作用, 通过光弹效应使光栅的折射率调制再次发生变化, 因此谐振波长发生向长波或短波漂移的现象, 而漂移方向则取决于二次曝光与首次曝光之间的照射方位角度差  $\Delta\theta$  的值。

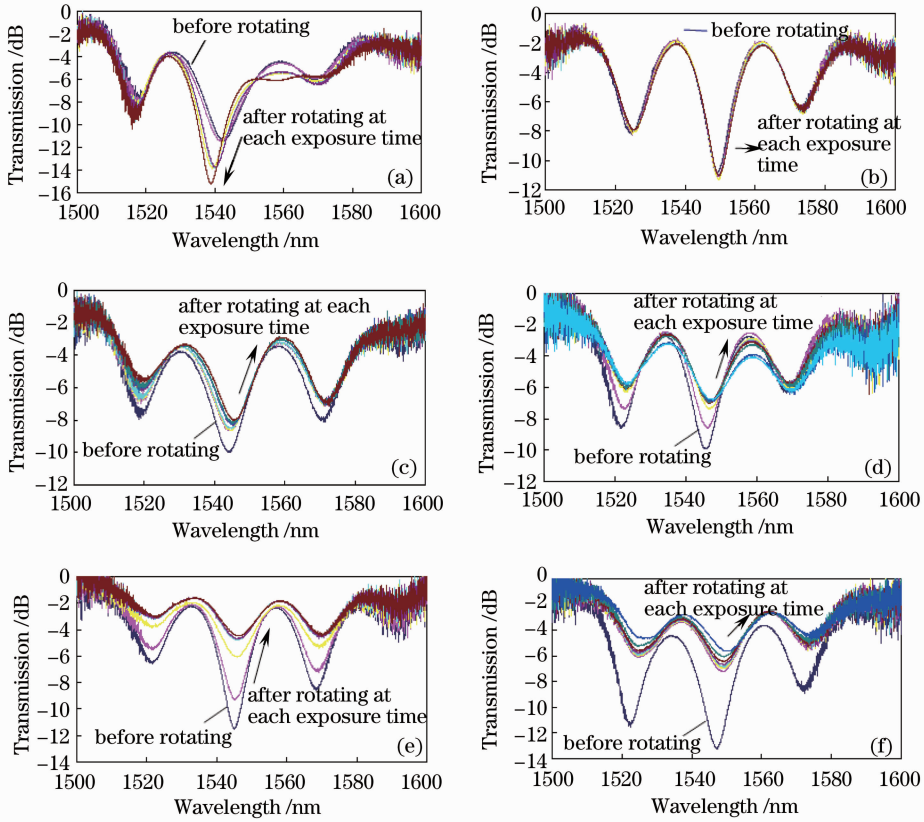


图 3 以不同方位角度差写入长周期光纤光栅过程中透射谱的演变。  $\Delta\theta=$  (a)  $30^\circ$ ; (b)  $60^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $120^\circ$ ; (e)  $150^\circ$ ; (f)  $180^\circ$

Fig. 3 Transmission spectrum evolution of the LPFG with different projection angle differences at each exposure time  $\Delta\theta=$  (a)  $30^\circ$ ; (b)  $60^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $120^\circ$ ; (e)  $150^\circ$ ; (f)  $180^\circ$

表 1 透射谱特性总结

Table 1 Transmission spectrum characteristics

$\Delta\theta=30^\circ$				$\Delta\theta=60^\circ$			
Fiber state	Exposure times	Wavelength /nm	Amplitude /dB	Fiber state	Exposure times	Wavelength /nm	Amplitude /dB
Before rotating	5	1542.32	-11.432	Before rotating	5	1549.16	-10.844
	1	1541.68	-11.412		1	1549.16	-11.120
	2	1540.68	-13.067		2	1549.56	-11.304
After rotating	3	1540.28	-13.789	After rotating	3	1549.72	-11.010
	4	1540.16	-13.745		4	1549.64	-10.991
	5	1538.76	-15.206		5	1549.56	-11.049
Maximal difference		-3.56	-3.774	Maximal difference		0.4	-0.205

(续表 1)

$\Delta\theta=90^\circ$				$\Delta\theta=120^\circ$			
Fiber state	Exposure times	Wavelength /nm	Amplitude /dB	Fiber state	Exposure times	Wavelength /nm	Amplitude /dB
Before rotating	7	1544.16	-9.992	Before rotating	8	1545.76	-9.912
	1	1544.64	-8.66		1	1545.88	-8.577
	2	1544.84	-8.622		2	1546.44	-7.381
	3	1545.00	-8.517		3	1546.44	-6.987
After rotating	4	1545.40	-8.302	After rotating	4	1546.56	-6.986
	5	1545.08	-8.263		5	1546.72	-6.999
	6	1545.12	-8.188		6	1546.8	-6.961
	7	1545.40	-8.024		7	1547.24	-6.887
Maximal difference		1.24	1.968	Maximal difference		1.88	3.137
$\Delta\theta=150^\circ$				$\Delta\theta=180^\circ$			
Fiber state	Exposure times	Wavelength /nm	Amplitude /dB	Fiber state	Exposure times	Wavelength /nm	Amplitude /dB
Before rotating	5	1545.04	-11.49	Before rotating	7	1547.36	-13.217
	1	1545.12	-9.278		1	1549.04	-7.214
	2	1545.84	-6.056		2	1549.04	-6.981
	3	1545.76	-4.785		3	1549.08	-6.843
after rotating	4	1545.88	-4.714	after rotating	4	1549.00	-6.703
	5	1546.72	-4.481		5	1549.16	-6.453
Maximal difference		1.68	7.009		Maximal difference		2.28

为了进一步研究照射方位角度差与光栅透射谱演变之间的关系,对  $\Delta\theta=15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 105^\circ, 135^\circ$  和  $165^\circ$  分别重复进行了上述实验,得到的光谱变化情况如图 4 所示。从图中光谱的演变情况可以看出,  $\Delta\theta=15^\circ$  时谐振峰的变化趋势与  $\Delta\theta=30^\circ$  类似,光栅的谐振峰随着曝光次数的增加向短波方向漂移,且谐振峰幅值逐渐减小;  $\Delta\theta=45^\circ$  时,光栅的谐振峰的变化趋势与  $\Delta\theta=60^\circ$  相比,其谐振峰幅值在一个数值附近浮动,但谐振波长已经明显向长波方向漂移;  $\Delta\theta=75^\circ$  时谐振峰幅值同样随着曝光次数的增加而逐渐增加,但谐振峰的波长却向短波方向漂移,  $\Delta\theta=105^\circ, 135^\circ$  和  $165^\circ$  时,光栅的谐振峰波长的漂移方向与谐振峰幅值的变化趋势均与  $\Delta\theta=90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  和  $180^\circ$  时类似。可见,  $\Delta\theta$  影响着光栅谐振波长漂移方向,角度差较小时(如  $\Delta\theta=15^\circ$  和  $30^\circ$ )谐振波长向短波方向漂移,角度差较大时( $\Delta\theta>90^\circ$ )光栅的谐振波长则向长波方向漂移。

通过上述实验结果,可以定性地分析出非对称照射方向夹角对光栅透射谱的影响,在采用非对称双侧曝光的方法制备长周期光纤光栅时,选取不同的非对称照射方向夹角能够使光栅的谐振峰向不同

的方向漂移,并且谐振峰幅值的变化也因两次照射方向夹角的不同而有所差异。照射方位角度差较小时,谐振峰幅值在原有基础上更加深入,这说明折射率调制深度增加,因此二次曝光对首次曝光有加强的作用,同时谐振波长向短波方向漂移;照射方位角度差较小时,谐振峰幅值在原有基础上被削弱,说明折射率调制变小,此时二次曝光抵消一部分首次曝光的作用,谐振波长向长波方向漂移。从整个角度范围内来看,随着角度差的增加,二次曝光对首次曝光的作用从加强逐渐向削弱转变,角度差在中间范围内时,谐振波长和谐振峰幅值的变化规律不明显,但是在  $\Delta\theta=60^\circ$  时,二者几乎保持不变。通常在制备长周期光纤光栅前,首先要选定一个设计波长,并结合已知的纤芯和包层有效折射率差,通过(1)式计算出光栅的周期,然后再进行长周期光纤光栅的制备。根据前面的理论分析,在长周期光纤光栅的写入过程中,谐振波长因包层模阶次的不同会向长波或短波方向漂移,往往得不到与设计波长吻合的透射谱。因此,在实际应用中可以通过选取不同照射方位角度差的非对称双侧曝光技术来实现对长周期光纤光栅透射谱的调整与控制。



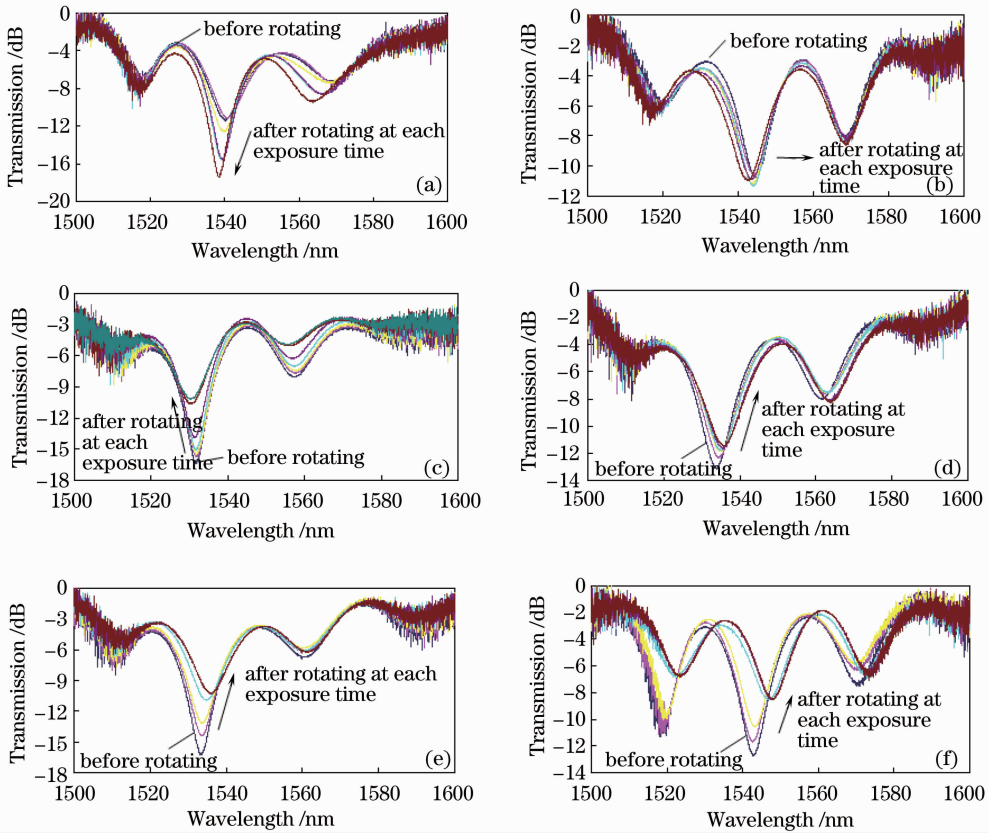


图4 以不同方位角度差写入长周期光纤光栅过程中传输谱的演变。 $\Delta\theta =$  (a)  $15^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $75^\circ$ ; (d)  $105^\circ$ ; (e)  $135^\circ$ ; (f)  $165^\circ$

Fig. 4 Transmission spectrum evolution of the LPFG with different projection angle differences  $\Delta\theta =$  (a)  $15^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $75^\circ$ ; (d)  $105^\circ$ ; (e)  $135^\circ$ ; (f)  $165^\circ$

### 3.3 非对称热应力作用对传感特性的影响

当光栅外界环境发生变化时,光栅的周期、纤芯和包层的有效折射率会发生变化,所以通过检测谐振峰的变化情况,可以得到外界物理量的变化,这是长周期光纤光栅应用各种传感系统的基本原理。考虑到  $\Delta\theta = 180^\circ$  是非对称双侧曝光的特殊情况,属于对称双侧曝光的形式。为了研究非对称热应力对长周期光纤光栅的传感特性的影响,对以非对称曝光夹角  $\Delta\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$  制作的 LPFG 的应变特性和扭转特性进行了实验研究,同时与单侧曝光方法制备的长周期光纤光栅的应变和扭转特性进行了对比实验研究。

#### 3.3.1 轴向应变传感特性

采用图2实验装置进行长周期光纤光栅轴向应变响应测试,将长周期光纤光栅的两端分别固定在左右两个旋转盘的V型槽内,左侧不动,将右侧以0.05 mm的步长向右拉伸,总拉伸量为1 mm,并记

录透射谱的变化情况。单侧曝光与非对称双侧曝光制作的长周期光纤光栅的轴向应变响应曲线如图5所示。从图中可以看出,无论是单侧曝光还是非对称曝光制作的长周期光纤光栅,在应变  $0 \sim 500 \mu\epsilon$  范围内谐振波长均随着应变量的增加而逐渐向长波方向漂移,谐振峰幅值则逐渐增大或减小,当应变较大时,谐振峰的波长和幅度基本保持不变。图5(c),(e)显示  $\Delta\theta = 90^\circ$  和  $150^\circ$  时,其谐振峰幅度的变化方向与其他相反。在  $0 \sim 500 \mu\epsilon$  范围内,对应图5中各个长周期光纤光栅谐振波长灵敏度分别为  $0.0037 \text{ nm}/\mu\epsilon, 0.002 \text{ nm}/\mu\epsilon, 0.003 \text{ nm}/\mu\epsilon, 0.0057 \text{ nm}/\mu\epsilon, 0.0073 \text{ nm}/\mu\epsilon$  和  $0.0028 \text{ nm}/\mu\epsilon$ , 其中  $\Delta\theta = 120^\circ$  和  $150^\circ$  时谐振波长灵敏度均高于单侧曝光制作的长周期光纤光栅灵敏度2倍以上,与三束光聚焦制备的长周期光纤光栅相比<sup>[15]</sup>,这种方法制备的长周期光纤光栅的应变灵敏度要高得多。

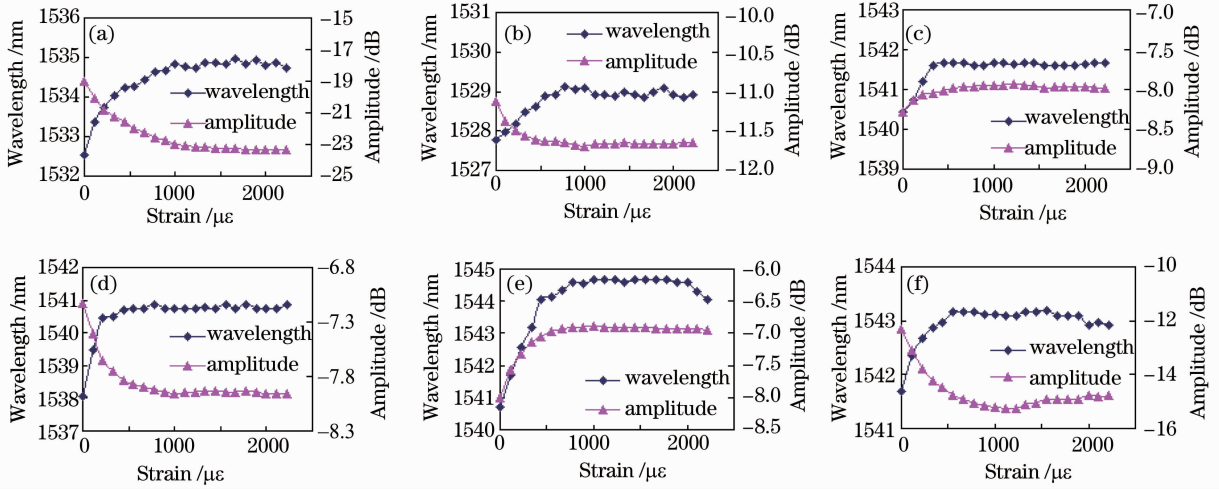


图 5 采用非对称双侧曝光方法以方位角度差  $\Delta\theta =$  (a)  $30^\circ$ ; (b)  $60^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $120^\circ$ ; (e)  $150^\circ$  及单侧曝光法 (f) 制作的长周期光纤光栅应变特性曲线

Fig. 5 Strain response of the LPFG fabricated by asymmetric exposure method with  $\Delta\theta =$  (a)  $30^\circ$ ; (b)  $60^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $120^\circ$ ; (e)  $150^\circ$  and (f) single-side exposure method

### 3. 3. 2 扭转传感特性

同样采用图 2 实验装置进行长周期光纤光栅扭转响应测试。实验中通过三维调节架调节两个旋转盘距离  $L = 15\text{ cm}$ , 步进电机控制使右侧转盘不动, 左侧转盘以每  $15^\circ$  间隔顺时针从  $0^\circ$  旋转到  $180^\circ$ ; 再将其恢复初始状态, 同样以每  $15^\circ$  间隔逆时针从  $0^\circ$  旋转到  $-180^\circ$ , 谐振峰的波长和幅值随扭转角度的变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出,  $\Delta\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  和  $120^\circ$  时, 谐振波长随扭转角度增加向短波方向线性漂移, 灵敏度分别为  $-0.0083\text{ nm}/(^\circ)$ ,  $-0.0058\text{ nm}/(^\circ)$ ,  $-0.0032\text{ nm}/(^\circ)$  和  $-0.0021\text{ nm}/(^\circ)$ , 这种变化趋势与图 6(f) 中单侧曝光的扭转响应曲线类似, 单侧曝光时谐振波长扭转响应

灵敏度为  $-0.0053\text{ nm}/(^\circ)$ 。其中  $\Delta\theta = 30^\circ$  和  $60^\circ$  时谐振波长对扭转响应的灵敏度要高于单侧曝光的情况, 而  $\Delta\theta = 90^\circ$  和  $120^\circ$  时谐振波长的灵敏度与单侧曝光情况相比要小得多。 $\Delta\theta = 150^\circ$  时, 在扭转角度从  $-180^\circ$  增加到  $-60^\circ$  过程中, 谐振波长随扭转角度增加向短波方向漂移, 扭转角度从  $-60^\circ$  增加到  $180^\circ$  过程中, 谐振波长则向长波方向漂移。可见, 采用非对称双侧曝光技术制备的长周期光纤光栅因  $\Delta\theta$  的不同, 对扭转的响应也不同。实验中还发现夹角较小时, 谐振峰幅值对扭转的响应曲线呈良好的线性, 即  $\Delta\theta = 30^\circ, 60^\circ$  时, 对应的灵敏度为  $-0.028\text{ dB}/(^\circ)$  和  $0.0093\text{ dB}/(^\circ)$ 。 $\Delta\theta = 90^\circ, 120^\circ$  和  $150^\circ$  时, 谐振峰幅值随着扭转角度的增加均先减小后增

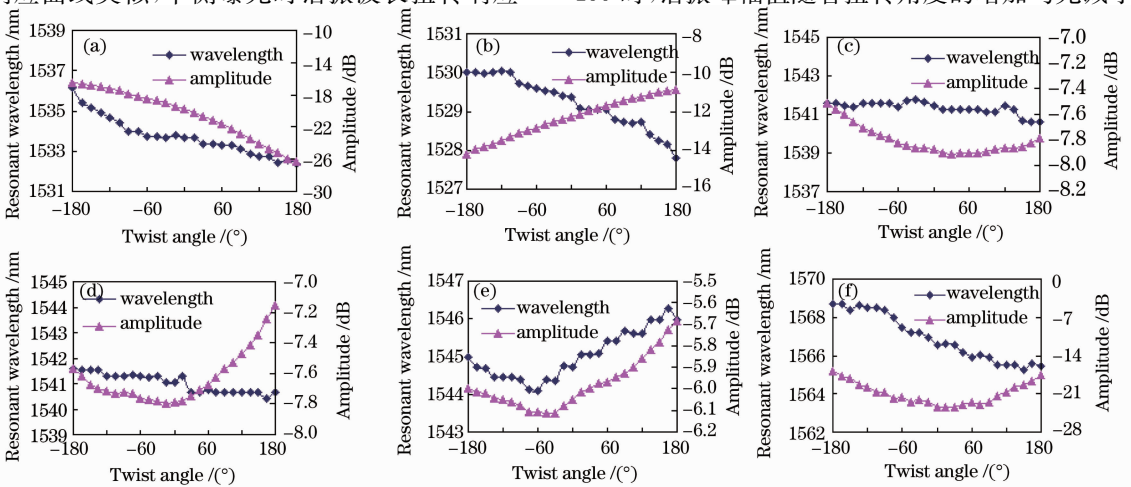


图 6 采用非对称双侧曝光方法以不同方位角度差  $\Delta\theta =$  (a)  $30^\circ$ ; (b)  $60^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $120^\circ$ ; (e)  $150^\circ$  及单侧曝光法 (f) 制作的长周期光纤光栅扭转特性曲线

Fig. 6 Twist response of the LPFG fabricated by asymmetric exposure method with  $\Delta\theta =$  (a)  $30^\circ$ ; (b)  $60^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $120^\circ$ ; (e)  $150^\circ$  and (f) single-side exposure method

加,  $\Delta\theta=90^\circ$ 时, 谐振峰幅值增加的幅度明显小于其减小的幅度, 而  $\Delta\theta=120^\circ$ 和  $150^\circ$ 时, 谐振峰幅值增加的幅度明显大于对应的减小幅度, 对于单侧曝光的情况, 谐振峰幅值增加和减小的幅度基本相等。因此这种长周期光纤光栅谐振波长与幅值的变化可用于实现对扭转角度大小和方向的监测。

## 4 结 论

用  $\text{CO}_2$  激光脉冲采用非对称双侧曝光的方法能够在普通单模光纤中写入长周期光纤光栅。理论分析发现, 先后两次热应力在光纤圆周横截面上作用方向的不同导致了长周期光纤光栅谐振波长的漂移方向不同, 实验结果验证了上述理论分析结果。在实际应用中, 通过选取不同的照射方位角度差进行二次曝光, 可以实现对所需光栅谐振波长的调整, 以弥补或改善未满足设计要求的长周期光纤光栅对谐振波长的控制。采用不同照射方位角度差制备的长周期光纤光栅在应用于构造长周期光纤光栅应变传感器和扭转传感器时具有不同的响应特性, 因此可以通过调整照射方位角度差的值来控制所制作的光纤传感器的响应特性, 以适应不同传感灵敏度的需求情况下的应用。

## 参 考 文 献

- 1 Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjing *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1129~1133  
宋 韵, 朱 涛, 饶云江等. 旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1129~1133
- 2 Miao Yingping, Liu Bo, Zhao Qida *et al.*. Simultaneous measurement of bending-curvature and temperature using single tilted fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2388~2392  
苗银萍, 刘 波, 赵启大等. 用单一倾斜光纤光栅实现曲率和温

- 度的同时测量[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2388~2392
- 3 S. Yamasaki, M. Akiyama, K. Nishide *et al.*. Characteristics of long period fiber grating utilizing periodic stress relaxation under high temperature environment[C]. *SPIE*, 1999, **3746**: 385~388
- 4 T. Enomoto, M. Shigehara, S. Ishikawa *et al.*. Long-period fiber grating in a pure-silica-core fiber written by residual stress relaxation[C]. *Proc. Optical Fiber Communication (OFC)*, 1998, San Diego, CA, ThG2: 277~278
- 5 B. H. Kim, Y. Park, T. J. Ahn *et al.*. Residual stress relaxation in the core of optical fiber by  $\text{CO}_2$  laser irradiation[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1657~1659
- 6 Y. Park, K. Oh, U. C. Pack *et al.*. Residual stress in a doubly clad fiber with depressed inner cladding (DIC)[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1823~1834
- 7 Y. Pack, T. J. Ahn, Y. H. Kim *et al.*. Novel technique for measuring the residual stress and the photoelastic effect profile of an optical fiber[C]. *Proc. Optical Fiber Communication (OFC)*, 2001, TuM4: 37~39
- 8 Y. Ishii, S. Okude, K. Nishide *et al.*. PDL reduction of long-period fiber grating by rotating exposure method[C]. *Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Commun.*, 2001, **3**: 354~355
- 9 V. Grubsky, J. Feinberg. Fabrication of axially symmetric long-period fiber gratings with a carbon dioxide laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2296~2298
- 10 T. W. MacDougall, S. Pilevar, C. W. Haggans *et al.*. Generalized expression for the growth of long period gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10): 1449~1451
- 11 Wang Yiping. Study on characteristics of novel long-period fiber gratings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. 42~65  
王义平. 新型长周期光纤光栅特性研究[D]. 重庆: 重庆大学博士学位论文, 2003. 42~65
- 12 A. E. Puro, K. J. E. Kell. Complete determination of stress in fiber preforms of arbitrary cross section[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(8): 1010~1014
- 13 Y. Hibino, F. Hanawa, M. Horiguchi. Drawing induced residual stress effects on optical characteristics in pure silica core single mode fibers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**(1): 30~34
- 14 T. Abe, Y. Mitsunaga, H. Koga. Photoelastic computer tomography: a novel measurement method for axial residual stress profile in optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(1): 133~138
- 15 Song Shide. Study on the characteristics and sending application of long period fiber gratings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. 55~79  
宋世德. 长周期光纤光栅的特性及传感应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. 55~79