

# 级联倾斜长周期光纤光栅传输谱特性研究

陆建国<sup>1</sup> 顾铮先<sup>1</sup> 高侃<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学理学院 光电功能薄膜实验室, 上海 200093

<sup>2</sup>中国电子科技集团公司第二十三研究所 第十研发部, 上海 200437

**摘要** 通过理论模拟和实验研究了级联倾斜长周期长纤光栅(CTLPG)的传输谱特性。基于耦合模理论和传输矩阵法,分析了级联长度、级联位置、级联个数和光栅倾角对级联倾斜长周期光纤光栅传输谱的影响;级联长度和级联位置对CTLPG和级联长周期光纤光栅(CLPG)传输谱的影响是一致的;随着光栅倾角的增大,CTLPG的二阶包层模对应的损耗峰增强,三阶包层模对应的损耗峰变化不明显,且二阶包层模显著强于三阶包层模,二阶模的传输谱对60°以上的光栅倾角的变化很敏感;级联段数的增加可以明显增加通带的宽度,且通带宽度与级联段数呈很好的线性关系(回归系数为0.9988),表明CTLPG在双峰滤波器中有良好的应用价值。实验上,利用逐点写入法刻制了CTLPG,通过实验结果和理论模拟结果的分析,发现实验和理论结果表现出较好的一致性。

**关键词** 光纤光学;级联光纤光栅;耦合模理论;倾斜长周期光纤光栅;传感

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1005005

## Spectral Characteristics of Cascaded Tilted Long Period Fiber Gratings

Lu Jianguo<sup>1</sup> Gu Zhengtian<sup>1</sup> Gao Kan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Photo-Electric Functional Films, College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

<sup>2</sup>No.10 R & D Department, No.23 Research Institute of China Electronics Technology Group, Shanghai 200437, China

**Abstract** The transmission spectral characteristics of the cascaded tilted long period fiber grating (CTLPG) are studied theoretically and experimentally. Based on the coupled-mode theory and transfer matrix method, the effects of cascading lengths, cascading location, the number of cascades and tilt angle on CTLPG transmission spectrum are simulated. The transmission spectrum of the CTLPG is consistent with the transmission spectrum of the cascaded long period fiber grating (CLPG) in cascading length and cascading location. The loss peaks of the second and 3rd-order cladding modes increase as the tilt angle is enhanced, and the second-order cladding mode is stronger than the 3rd-order mode. The second-order transmission spectra are sensitive to changes in the inclination for the angle above 60°. The width of the pass-bands increases along with the increase of the cascaded segments number, and they are in linear relationship. The results show that CTLPG has a good value in a bimodal filter. CTLPGs are made in experiments through point by point. Experimental results and theoretical simulations are comparatively analyzed, which demonstrates that they are in favorable consistency.

**Key words** fiber optics; cascaded fiber grating; coupled-mode theory; tilted long-period fiber grating; sensing

**OCIS codes** 060.2310; 060.2340; 060.2370; 310.3915

### 1 引言

倾斜长周期光纤光栅(TLPG)是一种特殊的均匀长周期光纤光栅,与普通的长周期光纤光栅(LPG)相

收稿日期: 2015-04-29; 收到修改稿日期: 2015-00-00

基金项目: 国家自然科学基金(60777035)、教育部科学技术研究重点项目(208040)、上海市教育委员会科研创新重点项目(11ZZ131)、上海市重点学科建设项目(S30502)及沪江基金(B14004)

作者简介: 陆建国(1988—),男,硕士研究生,主要从事光电功能薄膜、光纤光栅传感器等方面的研究。

E-mail: 466312035@qq.com

导师简介: 顾铮先(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜、光纤传感器等方面研究。

E-mail: zhengtiangu@163.com

比,其栅格平面的波矢方向与光纤的轴向成一定角度。长周期光纤光栅的周期一般为几十到几百微米之间,前向传输的包层模和纤芯模在满足相位匹配条件时发生耦合,从而会在传输谱中产生一系列离散的损耗峰<sup>[1]</sup>。而在TLPPFG中,倾斜光栅平面增强了光纤光栅包层模和纤芯模的耦合,可以激发高阶包层模和纤芯模的耦合<sup>[2]</sup>。同时TLPPFG与非倾斜的长周期光纤光栅相比,其传输谱对包层介质的折射率和厚度有更高的响应灵敏度,并且其倾斜角度可以灵活选取,所以TLPPFG非常适用于包层薄膜传感器<sup>[3-6]</sup>。

均匀长周期光纤光栅(ULPPFG)的传输谱在各次的模式中只有一个透射损耗峰,所以其光谱设计缺乏灵活性,而将多个光纤光栅级联,将会表现出很多新的特性。1998年,Ke等<sup>[7]</sup>理论上分析了相移长周期光纤光栅的级联特性,通过理论模拟了不同相移的级联光纤光栅的传输谱特性。2012年,王霞元等<sup>[8]</sup>研究了级联及相移长周期光栅的光谱特性,分析了级联处光纤的间距、位置对级联长周期光栅光谱的影响,并且分析了多个 $\pi$ 相移的级联长周期光纤光栅(CLPPFG)的传输谱特性,结果表明通带的宽度随着级联的个数增加而增加。2012年,曹莹等<sup>[9]</sup>分析了镀膜长周期光纤和布拉格(Bragg)光纤光栅系统(CLBG)之间的级联,分析了光纤长度、薄膜折射率、薄膜厚度等参数对反射谱的影响,发现CLBG反射峰对薄膜折射率的分辨率较单个镀膜长周期光纤光栅高2个数量级。目前,级联光纤光栅的研究主要集中在非倾斜光纤光栅的级联,对于级联倾斜光纤光栅的研究比较少,且集中在级联倾斜布拉格光纤光栅<sup>[10]</sup>。由于TLPPFG有很多不同于LPFG的特性,所以级联倾斜长周期光纤光栅(CTLPPFG)也会呈现出新的特性,这就需要对CTLPPFG进行理论和实验方面的研究。

本文基于耦合模理论,利用倾斜长周期光纤光栅的理论模型,通过传输矩阵法给出了级联倾斜光纤光栅的分析方法。在此基础上,理论模拟分析了级联处长度 $d$ 、级联处位置 $q$ 、光栅倾角 $\theta$ 和级联段数 $M$ 的CTLPPFG传输谱特性。实验上通过逐点写入技术,刻制了CTLPPFG,实验研究了级联处的不同长度、不同位置、不同倾斜角度和级联个数对级联光纤传输谱的特性,并对实验结果与理论模拟结果进行了比较分析。

## 2 理论分析

### 2.1 倾斜长周期光纤光栅结构

倾斜长周期光纤光栅结构如图1所示。图1(a)为倾斜光纤光栅横向结构示意图,纤芯折射率为 $n_1$ ,包层折射率为 $n_2$ ,薄膜厚度为 $n_3$ ,周围环境折射率为 $n_4$ ;光栅沿轴向的周期为 $\Lambda$ ,栅格平面波矢方向与光纤轴向夹角为 $\theta$ ,倾斜栅面的距离 $\Lambda_g = \Lambda \cos \theta$ 。图1(b)为倾斜光纤光栅截面示意图, $a_1$ 为纤芯半径、 $a_2$ 为包层半径、 $a_3$ 为薄膜层半径,则薄膜厚度为 $h = a_3 - a_2$ 。

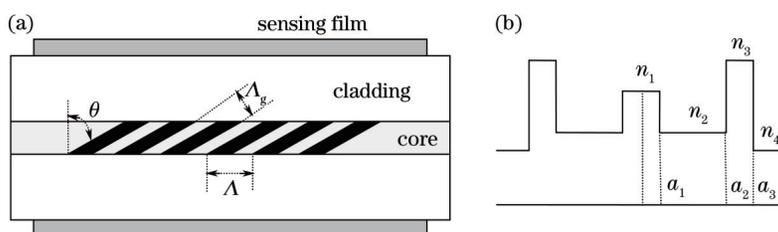


图1 TLPPFG示意图。(a) 结构图;(b) 折射率分布

Fig.1 Schematic diagram of TLPPFG. (a) Structural diagram; (b) refractive index profile

### 2.2 耦合模理论

根据文献[11-12],倾斜长周期光纤光栅的耦合模方程可表示为

$$\frac{dA_{co}}{dz} = if_{co-co}A_{co} + i \sum_{l,m} g_{lm-co}^+ A_{lm} \times \exp(-2i\delta_{lm-co}z), \quad (1)$$

$$\sum_{l,m} \left[ \frac{dA_{lm}}{dz} = iA_{lm} f_{lm-lm} + ig_{01-lm}^- A_{01} \times \exp(2i\delta_{01-lm}z) \right], \quad (2)$$

式中 $A_{co}$ 为纤芯模的振幅, $f_{co-co}$ 为纤芯模自耦合系数, $g_{lm-co}^+$ 为纤芯模和包层模互耦合系数, $A_{lm}$ 为 $l$ 阶 $m$ 次包层模的振幅, $\delta_{lm-co}$ 为 $l$ 阶 $m$ 次包层模与纤芯模的解调参量, $f_{lm-lm}$ 为包层模的自耦合系数。由于折射率调制只在纤芯中,包层模之间的互耦合系数相对于纤芯模与纤芯模之间的耦合和芯层模和包层模之间的耦合可以忽略。耦合系数分别为

$$f_{\text{co-co}} = \frac{\omega}{2} \varepsilon_0 n_1^2 \delta(z) \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{a_1} r dr (E_r^{\text{co}} E_r^{\text{co}*} + E_\varphi^{\text{co}} E_\varphi^{\text{co}*}), \quad (3)$$

$$g_{\text{lm-co}}^\pm = \frac{\omega}{4} \varepsilon_0 n_1^2 \delta(z) \nu \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a r dr \exp(\mp 2iK_g r \cos \varphi \sin \theta) (E_r^{\text{cl}} E_r^{\text{co}*} + E_\varphi^{\text{cl}} E_\varphi^{\text{co}*}), \quad (4)$$

$$\delta_{\text{lm-co}} = \frac{1}{2} (\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{lm}} - 2K_g \cos \theta), \quad (5)$$

式中  $E_r$  为模式场径向分量,  $E_\varphi$  为模式场切向分量,  $\omega$  为光波角频率,  $\varepsilon_0$  为真空中介电常数,  $\delta(z)$  为光纤  $z$  处的纤芯折射率变化量,  $\nu$  为条纹可见度,  $K_g = \pi/\Lambda_g$ ,  $\beta_{\text{co}}$  为纤芯模传播常数,  $\beta_{\text{lm}}$  为  $l$  阶  $m$  次包层模传输常数。解调参量  $\delta_{\text{lm-co}} = 0$  时, 即是倾斜长周期光纤光栅的相位匹配条件, 得到  $\lambda = [n_{\text{eff}}^{\text{co}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{lm}}(\lambda)]\Lambda$ , 其中  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  为纤芯模有效折射率,  $n_{\text{eff}}^{\text{lm}}$  为包层模有效折射率, 有效折射率可以通过求解多层圆柱光纤光栅的特征方程求得。

### 2.3 级联倾斜光纤光栅分析方法

如图 2 所示, CTLPG 的结构是两段或更多段均匀倾斜光纤光栅通过长度为  $d$  的级联光纤连接的一根光纤光栅。图 2(a) 为 CTLPG 的横向示意图。图 2(b) 为 CTLPG 的坐标轴示意图, 其中  $Z$  轴沿着纤芯的方向, 纤芯的垂直方向为  $X$  轴方向, 光栅倾斜面的垂直方向为  $Z'$  轴方向, 沿着光栅倾斜面的方向为  $X'$  轴方向。

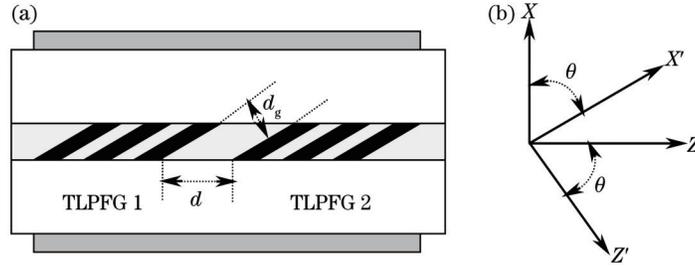


图 2 CTLPG 示意图。(a) CTLPG 结构; (b) CTLPG 坐标系

Fig.2 Schematic diagram of CTLPG. (a) Structural diagram of CTLPG; (b) coordinate of CTLPG

由图 2(b) 可知:

$$z' = z \cos \theta - x \sin \theta. \quad (6)$$

对于相同折射率结构的级联, 可以通过传输矩阵法处理。首先给出每一个 TLPG 的传输矩阵, 由于 TLPG 中只存在前向传输的芯层模和前向传输的包层模, 级联光纤中, 模式耦合包括芯层模和芯层模耦合、芯层模和包层模耦合、包层模和包层模耦合, 运用  $2 \times 2$  的矩阵可以表示级联处的传输矩阵。然后将这些传输矩阵依次相乘可以得到总的传输矩阵。设初始条件为纤芯模的起始端振幅  $t_0$ , 包层模的起始端振幅  $r_0$ , 依据文献[13-14]:

$$\begin{bmatrix} t \\ r \end{bmatrix} = F_M \times F_M^c \cdots F_i \times F_i^c \cdots F_1 \times \begin{bmatrix} t_0 \\ r_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $t$  为纤芯模的振幅,  $r$  为 CTLPG 包层模的振幅,  $M$  为级联光纤的总级联段数,  $i$  为级联光纤的第  $i$  段光纤,  $F_i$  为第  $i$  段的均匀光纤光栅传输矩阵,  $F_i^c$  为第  $i$  段级联处的传输矩阵。  $F_i$  和  $F_i^c$  分别为

$$F_i = \begin{bmatrix} t_i & r_i \\ r_i & t_i^* \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$F_i^c = \begin{cases} \exp[i\pi(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})d_g^i/(\lambda \cos \theta)] & 0 \\ 0 & \exp[-i\pi(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})d_g^i/(\lambda \cos \theta)] \end{cases}, \quad (9)$$

式中,

$$t_i = \cos(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2} L) + i \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2}} \sin(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2} L), \quad (10)$$

$$r_i = i \frac{\kappa}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2}} \sin(\sqrt{\hat{\sigma}^2 + k^2} L), \quad (11)$$

式中  $\hat{\sigma} = \delta + (\sigma_{11} + \sigma_{22})/2$ ,  $\hat{\sigma}$  为直流耦合系数,  $\sigma_{11}$  为纤芯模的自耦合系数,  $\sigma_{22}$  为包层模的自耦合系数,  $k$  为

纤芯模和包层模的互耦合常数,  $\delta$  为纤芯模与包层模之间的解调系数。初始条件  $t_0 = 1, r_0 = 0$ , 光纤长度为  $L$ , 级联倾斜长周期光纤光栅的透射率为  $T = |t/t_0|^2 = t^2$ 。

### 3 仿真与分析

如无单独说明, 仿真分析中的光栅参数如下:  $a_1 = 2.625 \mu\text{m}, a_2 = 62.4 \mu\text{m}, h = 0.2 \mu\text{m}, n_1 = 1.4681, n_2 = 1.4628, n_3 = 1.75, n_4 = 1$ , 纤芯平均折射率改变量为 0.0004, 光栅周期  $\Lambda$  为  $450 \mu\text{m}$ , 倾斜角度  $\theta = 60^\circ$ 。CTLPGF 的两段光纤光栅的长度分别为  $L_1 = L_2 = 13.5 \text{ mm}$ , 光纤光栅的总长为  $L = L_1 + L_2 = 27 \text{ mm}$ 。  $q$  为级联光纤光栅的位置参量, 定义为  $q = L_1/L - 0.5$ 。

#### 3.1 级联长度对级联倾斜光栅的传输谱影响

图 3 为不同级联长度的级联倾斜光栅传输谱, 级联长度  $d$  分别为  $112.5, 225, 337.5, 450 \mu\text{m}$ 。可以看出,  $d$  为  $450 \mu\text{m}$  时, 传输谱在  $1473 \text{ nm}$  处有一个主损耗峰;  $d$  为  $112.5 \mu\text{m}$  和  $337.5 \mu\text{m}$  时, 传输谱有 2 个损耗峰, 2 个损耗峰的中心在  $1473 \text{ nm}$  处。当级联长度从 0 到  $450 \mu\text{m}$  时, 传输谱出现 2 个损耗峰, 左边的损耗峰逐渐变强, 并随着级联长度的增加向长波长方向移动, 右边的损耗峰逐渐变弱, 并随着级联长度的增加向长波长方向移动, 级联长度增加到  $450 \mu\text{m}$  时传输谱又变为单峰, 且峰的位置最深。这和非倾斜长周期光纤光栅的特性是一致的<sup>[7-8]</sup>。

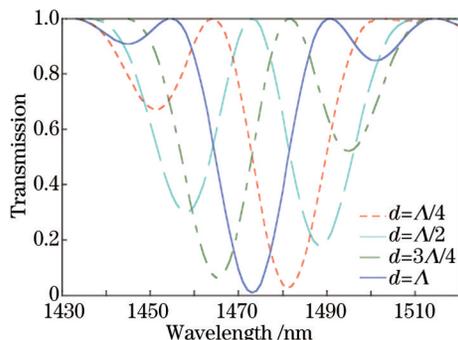


图 3 不同级联长度的 CTLPGF 传输谱

Fig.3 Transmission spectra of CTLPGF with different cascade lengths

#### 3.2 级联相对位置对级联倾斜光栅的传输谱影响

图 4 是级联长度为  $225 \mu\text{m}$  时,  $q$  分别为  $-0.5, -0.25, 0, 0.25$  的传输谱。当  $q$  为  $\pm 0.5$  时, 此时传输谱相当于

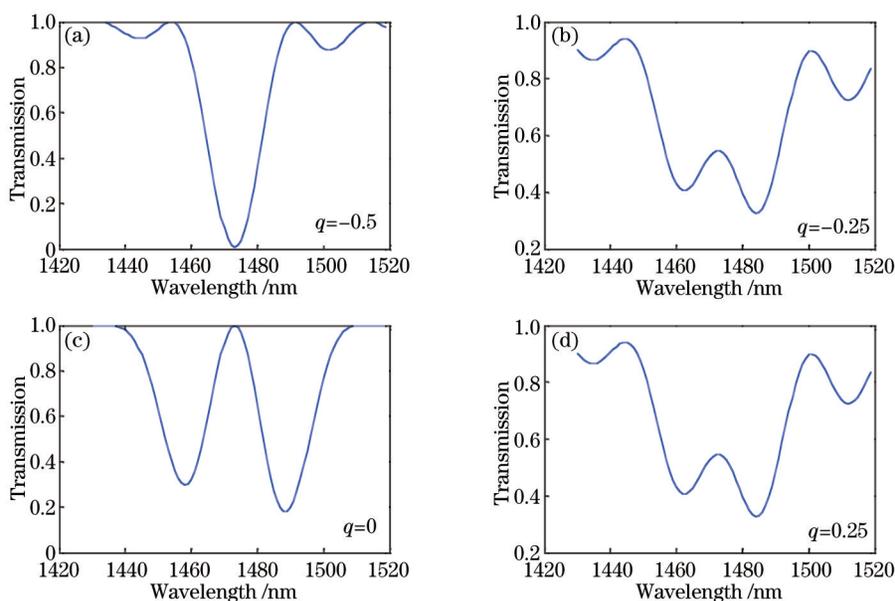


图 4 不同级联位置 CTLPGF 传输谱。(a)  $q = -0.5$ ; (b)  $q = -0.25$ ; (c)  $q = 0$ ; (d)  $q = 0.25$

Fig.4 Transmission spectra of CTLPGF with different cascade positions. (a)  $q = -0.5$ ; (b)  $q = -0.25$ ; (c)  $q = 0$ ; (d)  $q = 0.25$

均匀 TLPFG 的传输谱,其损耗峰的位置在 1473 nm,如图 4(a)所示。当  $q$  为 0 时,级联位置在光纤光栅中间,此时 CTLPG 出现近似对称的 2 个损耗峰,损耗峰分别位于 1458 nm 和 1498 nm,如图 4 (c)所示。当  $q$  为  $\pm 0.25$  时,CTLPG 的 2 个损耗峰的位置分别是 1464 nm 和 1484 nm,2 个损耗峰之间的距离比  $q$  为 0 时减小了 18 nm,其 2 个损耗峰的中心位置依然是 1473 nm,如图 4(b)、(d)所示。当级联位置由中心向两端移动时,2 个损耗峰逐渐变弱,直至两峰过渡为一个峰。这和文献[7-8]中非倾斜长周期光纤光栅的特性是吻合的。

### 3.3 光纤倾角对 CTLPG 高阶模的影响

图 5 给出了级联长度为 225  $\mu\text{m}$ 、倾角为  $0^\circ\sim 88^\circ$  时,一阶、二阶和三阶( $l=1,2,3$ )传输谱的最大损耗峰值图。可以看出随着倾角的增加,一阶包层模的耦合强度变弱,二阶包层模耦合强度变强,三阶包层模耦合强度变化不明显,且二阶包层模比三阶包层模耦合强度要强。对于二阶包层模,光栅倾角从  $0^\circ$  角度变到  $60^\circ$  时,其损耗峰值下降了 0.002;当角度从  $60^\circ$  增加到  $80^\circ$  时,其透射谱损耗峰值下降了 0.073;当角度从  $80^\circ$  增加到  $87^\circ$  时,其透射谱损耗峰值下降了 0.613。可见,当光栅倾角大于  $60^\circ$  之后,随着光栅倾角的增大,二阶包层模传输谱的损耗峰开始下降,尤其当光栅倾角大于  $80^\circ$  时,透射谱的损耗峰值随着光栅倾角的增大而急剧下降。

图 6 是级联长度为 225  $\mu\text{m}$ 、倾斜角度  $\theta$  分别为  $84^\circ, 85^\circ, 86^\circ, 87^\circ$  时,CTLPG 的二阶 5 次包层模耦合对应的传输谱图。从中看出倾角为  $88^\circ$  时耦合强度最强,倾角为  $84^\circ$  时耦合强度最弱,损耗峰的位置分别是在 1519~1539 nm。之所以随着角度变大二阶包层模耦合强度变强,是因为倾斜光栅平面增强了二阶包层模的耦合系数,从而提高了光纤光栅包层模和纤芯模的耦合。这些特性是 CLPG 所不具有的,同时说明倾角大于  $80^\circ$  的 CTLPG 对倾角的变化很敏感,并且随着光栅倾角的增大透射谱的峰值变化越明显。对于像压力和弯曲等可改变光栅倾角量的参量,可作为该参量的传感器。

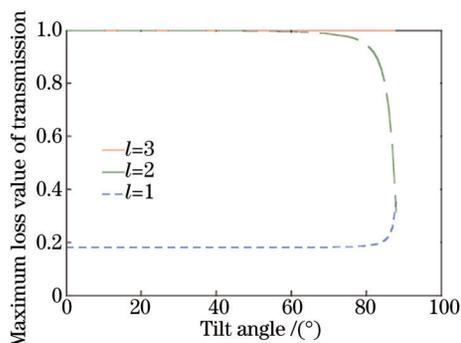


图 5 CTLPG 传输谱的最大损耗值随倾角的变化关系  
Fig.5 Maximum loss values of transmission spectra of CTLPG versus tilt angles

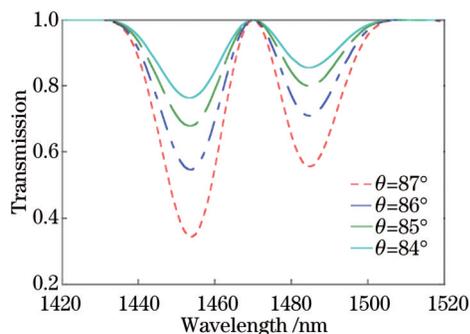


图 6 不同倾角下级联倾斜光纤光栅二阶包层模传输谱图  
Fig.6 Transmission spectra of second-order mode of CTLPG with different tilt angles

### 3.4 多级级联的传输谱特性

在倾斜光纤光栅中均匀引入  $M$  个级联段,倾斜光纤光栅的长度  $L$  为 3 cm,级联长度为 225  $\mu\text{m}$ 。图 7 给出了多级级联的传输谱图,可以看出  $M$  为 2 时,传输谱有 2 个阻带;当  $M$  增加至 3 时,传输谱有 2 个阻带,在阻带

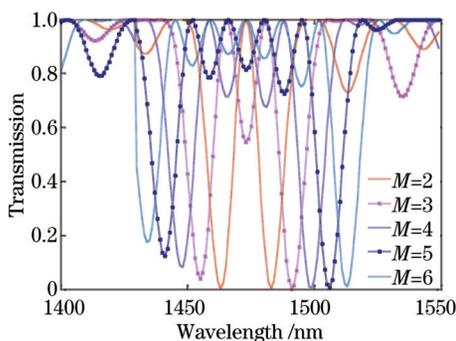


图 7 不同级联段数 CTLPG 透射谱  
Fig.7 Transmission spectra of CTLPG with different numbers of cascade segments

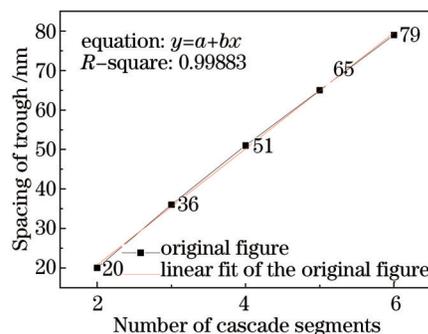


图 8 级联段数与通带宽度关系图  
Fig.8 Relationship of pass bandwidth and number of cascade segments

之间有 1 个小损耗峰;当  $M$  增加至 4 时,传输谱有 2 个阻带,在阻带之间有 2 个小损耗峰,并且这 2 个小损耗峰比  $M$  是 3 时的小损耗峰削弱了;当  $M$  增加为 5 时,传输谱有 2 个阻带,在阻带之间有 3 个小损耗峰,并且这 3 个小损耗峰比  $M$  为 2 时的小损耗峰进一步削弱。可见,传输谱的小损耗峰的个数总是比段数  $M$  少 2,同时随着  $M$  的增加,2 个阻带之间的间隔也变宽了。这和文献中[7]非倾斜长周期光纤光栅的特性是一致的。图 8 显示了级联段数  $M$  与阻带宽度关系,表明 2 个阻带之间的间隔和级联段数  $M$  呈很好的线性变化(回归系数  $R$  为 0.99883),比文献[6]中 CTLPG 所呈现的线性度好。根据实际需要,CTLPG 可通过改变引入的级联段数  $M$  来调整 2 个阻带之间的带宽,体现了 CTLPG 良好的双峰滤波特性。

## 4 实 验

实验借助于准分子激光器,在载氢的单模光纤(SMF)中刻制不同级联的 CTLPG。图 9 是 CTLPG 刻制装置示意图,其中激光器为 KrF 准分子激光器,工作波长为 248 nm;凸透镜焦距为 18 cm;狭缝的倾斜角度为  $0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ,其对应缝宽分别为 300, 212, 173  $\mu\text{m}$ ;位移平台设定步长为 450  $\mu\text{m}$ ,每步停留时间为 20 s,级联处的长度通过设定位移平台在级联处的步长来实现。

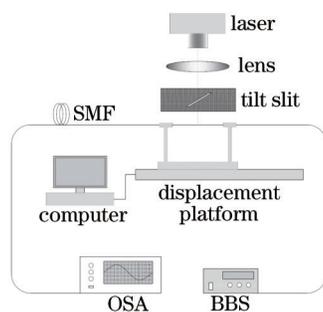


图 9 CTLPG 刻制装置

Fig.9 Experimental setup for writing CTLPG

CTLPG 刻制实验步骤如下:将单模光纤放入 15 MPa 的高压氢气舱中,载氢 1 周后放入低温舱中备用;调试准分子激光器,按图所示调整好光栅刻制的光路;取出已载氢处理的光纤,将其需要刻制光栅的地方剥皮并固定在步进马达上,两端连接上宽带光源(BBS)和光纤光谱仪(OSA);调整光路,设置准分子激光器脉冲能量为 25  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,脉冲频率为 150 Hz;位移平台的步长为 450  $\mu\text{m}$ ,每步停留时间为 20 s,开始刻制所需 CTLPG,同时通过光谱仪实时观察传输谱变化情况;取出已刻制好的光纤,放置到 120  $^\circ\text{C}$  的恒温箱中退火 12 h,得到温度稳定性较高的光纤光栅。

当载氢光纤在刻制过程中被紫外线照射时,可使折射率变化明显提高,但是氢载光纤中存在未反应的  $\text{H}_2/\text{D}_2$  会暂时引起光纤折射率的升高,这样光纤的热稳定性不好。通过退火除去了氢载光纤中残存的  $\text{H}_2/\text{D}_2$ ,增加了光栅的热稳定性<sup>[15-16]</sup>。

图 10 是级联倾斜长周期光纤光栅退火前后图。其中光纤参数:周期  $\Lambda$  为 450  $\mu\text{m}$ ,光栅长度为 2.7 cm,级联位置参数  $q$  为 0,光纤倾角为  $45^\circ$ 。退火条件:120  $^\circ\text{C}$  退火 12 h;光栅刻制完成后放置 12 h 进行退火处理。从

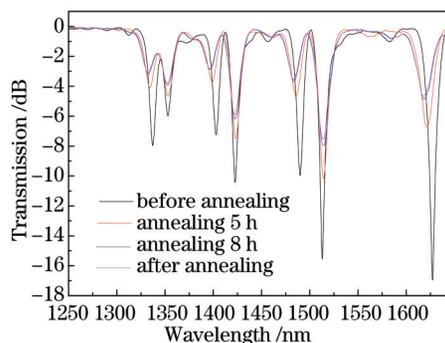


图 10 退火过程中 CTLPG 透射谱图

Fig.10 Transmission spectra of CTLPG in the annealing process

图中可以看出,退火过程中,光纤光栅的损耗峰峰值均减弱,第1,3,5损耗峰的位置向短波长方向偏移;且随着退火时间的推进,其变化量越来越小,说明光纤光栅的透射谱经退火过程趋于稳定。

#### 4.1 级联长度对 CTLPFG 的传输谱影响

图 11 为刻制不同级联长度的 CTLPFG 传输谱,其中周期  $\Lambda$  为  $450\ \mu\text{m}$ ,光栅长度为  $2.7\ \text{cm}$ ,级联位置参数  $q$  为 0。图 11(a)、(b)、(c)中,级联长度  $d$  分别为  $450, 112.5, 225\ \mu\text{m}$ 。可以看出,在其他相同的实验条件下,当级联长度为  $450\ \mu\text{m}$  时,各次包层模的传输谱只有一个主损耗峰;当级联长度为  $112.5\ \mu\text{m}$  时,传输谱阻带左侧出现一个小损耗峰;当级联的长度为  $225\ \mu\text{m}$  时,传输谱有 2 个明显的损耗峰,这与理论分析中图 3 所示的特性是一致的。

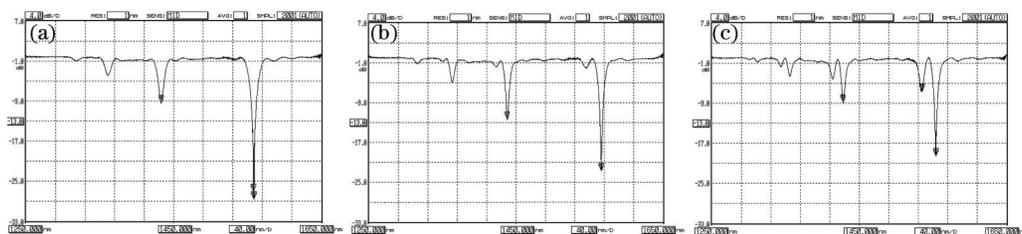


图 11 不同级联长度 CTLPFG 传输谱。(a)  $\Lambda=450\ \mu\text{m}$ ; (b)  $\Lambda=112.5\ \mu\text{m}$ ; (c)  $\Lambda=225\ \mu\text{m}$

Fig.11 Transmission spectra of CTLPFG with different cascade lengths. (a)  $\Lambda=450\ \mu\text{m}$ ; (b)  $\Lambda=112.5\ \mu\text{m}$ ; (c)  $\Lambda=225\ \mu\text{m}$

#### 4.2 级联相对位置对 CTLPFG 的传输谱影响

图 12 为级联不同位置的传输谱图,级联位置  $q$  分别为  $-0.25, 0, 0.25$  的传输谱。当  $q$  为 0 时,级联位置在光纤光栅中间,此时 CTLPFG 在  $1335\sim 1355\ \text{nm}$  之间出现近似对称的 2 个损耗峰,损耗峰的值比较低;当  $q$  为  $-0.25$  和  $0.25$  时,传输谱依然有 2 个损耗峰,这 2 个损耗峰的位置在  $1339\sim 1351\ \text{nm}$  之间,从图中可以看出这 2 个损耗峰之间靠得更近,2 个损耗峰的中心位置依然在  $1345\ \text{nm}$  附近。这与理论分析的结果大致相同的。

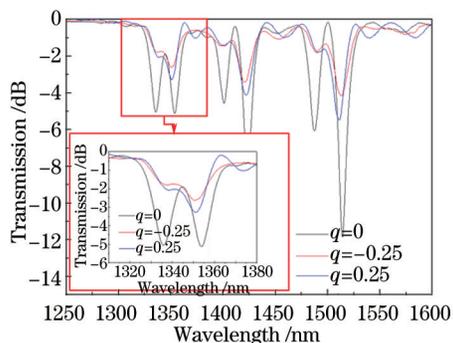


图 12 不同级联位置 CTLPFG 传输谱

Fig.12 Transmission spectra of CTLPFG with different cascade positions

#### 4.3 倾斜光纤倾角对 CTLPFG 高阶模的影响

图 13 是倾角分别为  $0^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  的级联光纤光栅的传输谱图。从图中可以看出 3 个角度的 CTLPFG 的传

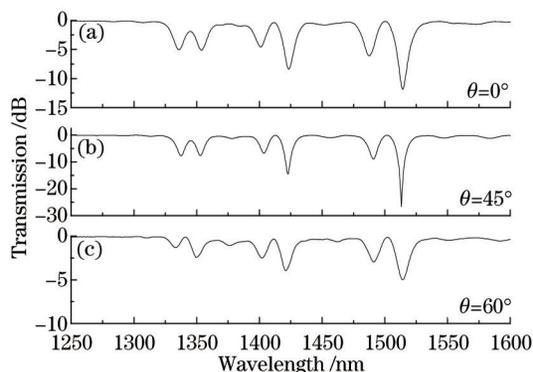


图 13 不同光栅倾角 CTLPFG 传输谱

Fig.13 Transmission spectra of CTLPFG with different tilt angles

传输谱都在 1350, 1420, 1510 nm 附近有 3 个模式的级联透射峰, 其他的位置没有出现明显的级联损耗峰, 45° 和 60° 的 CTLPFG 和没有倾斜的级联光纤光栅传输谱的损耗峰是相似的, 高阶模没有在传输谱中体现出来。由理论模拟可知, 当 CTLPFG 的倾角大于 80° 时, 传输谱才会出现明显的高阶模损耗峰。狭缝的宽度  $d_s = \Lambda \cos \theta$ , 倾角越大狭缝的宽度越小, 受实验条件所限, 当缝的宽度大于 80° 时, 缝的宽度太小, 没能制作出大倾角的 CTLPFG。对于大倾角的倾斜光纤光栅的制作, 可以通过高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写制<sup>[2]</sup>。

#### 4.4 多级级联的 CTLPFG 传输谱特性

图 14 为刻制多个级联段的 CTLPFG 传输谱。将  $M$  个相同的 TLPFG 级联, 每段之间的级联长度为 225  $\mu\text{m}$ 。图 14(a) 为  $M=1$ , 也就是没有级联的传输谱, 此时有 1 个阻带; 图 14(b) 为  $M=2$  的级联, 这时有 2 个阻带; 图 14(c) 为  $M=3$  的级联, 这时有 2 个阻带, 2 个阻带之间还有 1 个小的阻带, 这和图 5 的分析是吻合的。CTLPFG 可根据实际需要改变引入的级联段数  $M$  来调整 2 个阻带之间的间隔和带宽, 并且其制作容易、插入损耗低、结构紧凑, 这些将有利于其在通信方面的应用。

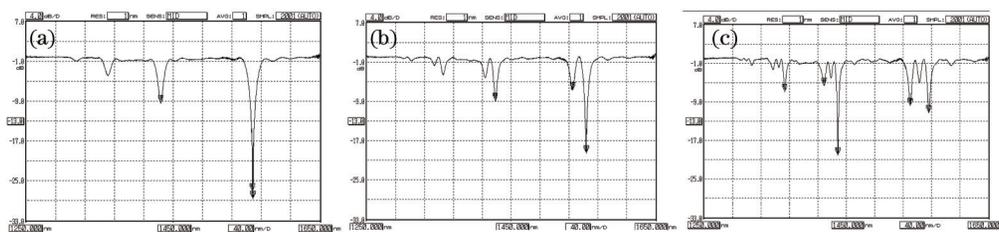


图 14 不同级联段数 CTLPFG 传输谱。(a)  $M=1$ ; (b)  $M=2$ ; (c)  $M=3$

Fig.14 Transmission spectra of CTLPFG with different cascades. (a)  $M=1$ ; (b)  $M=2$ ; (c)  $M=3$

## 5 结 论

运用耦合模理论和传输矩阵法, 理论研究 CTLPFG 的传输谱特性, 并与实验结果做了比较, 理论模拟的结果和实验有很好的—致性。与 CLPFG 的传输谱相比, 级联长度和级联位置对 CTLPFG 传输谱损耗峰值和损耗峰位置的影响是一致的。当光栅倾角增至 60° 以上时, CTLPFG 的二阶包层模对应的损耗峰增强, 而三阶包层模对应的损耗峰变化不明显; 特别当光栅倾角为 80° 以上时, 二阶包层模传输谱的损耗峰峰值对光栅倾角的变化极其敏感。对于像压力和弯曲等可影响光栅倾角量的参量, CTLPFG 可用作该参量的传感器。当多个 TLPFG 级联时, 增加级联段数, 不但可以减弱阻带之间的小损耗峰, 同时还可明显增加通带的宽度, 且通带宽度与级联段数呈很好的线性关系, 表明 CTLPFG 在双峰滤波器中有良好的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Genxiang, Liu Chunning, Li Tangjun, *et al.*. Study on long-period fiber gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(5): 624–628.  
陈根祥, 刘春宁, 李唐军, 等. 长周期光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2000, 20(5): 624–628.
- 2 Wei Shilei, Zhang Weigang, Fan Hongjian, *et al.*. Study on spectral properties of tilted long-period fiber grating written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806006.  
魏石磊, 张伟刚, 范弘建, 等. 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写制的倾斜长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0806006.
- 3 Ruan Juan, Zhang Weigang. A refractive index insensitive temperature sensor based on 45°-tilted grating pair[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 24(4): 735–739.  
阮 隽, 张伟刚. 基于 45° 倾斜光栅对实现折射率不敏感的温度测量[J]. 光电子·激光, 2012, 24(4): 735–739.
- 4 Shao Liyang, Laronche Albane, Smietana Mateusz, *et al.*. Highly sensitive bend sensor with hybrid long-period and tilted fiber Bragg grating[J]. Opt Commun, 2010, 283(13): 2690–2694.
- 5 Gu Zhengtian, Lan Jinlong. Design optimization of coated long-period fiber grating based on mode transition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105007.  
顾铮先, 蓝锦龙. 基于模式转换的镀膜长周期光纤光栅传感器的结构优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105007.

- 6 Miao Yinping, Liu Bo, Liu Jian, *et al.*. Tilted fiber bragg grating used for relative humidity sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(7): 977-982.  
苗银萍, 刘 波, 刘 健, 等. 基于倾斜光纤光栅的相对湿度传感器[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 977-982.
- 7 Ke H, Chiang K S, Peng J H. Analysis of phase-shifted long-period fiber gratings[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1998, 10(11): 1596-1598.
- 8 Wang Xiayuan, Huang Yonglin. Spectral characteristics of cascaded long-period gratings[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 821-826.  
王霞元, 黄勇林. 级联长周期光纤光栅的光谱特性研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 821-826.
- 9 Cao Ying, Gu Zengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405003.  
曹 莹, 顾铮先. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405003.
- 10 Cusano Andrea, Paladino Domenico, Iadicicco Agostino. Single and multiple phase shifts tilted fiber Bragg gratings[J]. Research Letters in Optics, 2009: 481010.
- 11 Erdogan T, Sipe J E. Tilted fiber phase grating[J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(2): 296-313.
- 12 Lee K S, Erdogan T. Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber gratings[J]. Appl Opt, 2000, 39(9): 1394-1404.
- 13 Chen Haiyun, Gu Zhengtian, Chen Xin. Characteristics of film sensor based on tilted long-period fiber gratings[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 3116-3121.  
陈海云, 顾铮先, 陈 鑫. 倾斜长周期光纤光栅薄膜传感器特性研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3116-3121.
- 14 Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.
- 15 Pei Li, Xie Zenghua, Ning Tigang, *et al.*. The anneal experiment of long and short period optical fiber grating[J]. Optical Technique, 2001, 27(4): 336-337.  
裴 丽, 谢增华, 宁提纲, 等. 长、短周期光纤光栅退火实验研究[J]. 光学技术, 2001, 27(4): 336-337.
- 16 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.

栏目编辑: 王晓琰