

# 长周期光纤光栅温度稳定性分析及其改善\*

秦 莉 韦占雄 王庆亚 韦 欣 郑 伟 张玉书 高鼎三  
(吉林大学电子工程系, 长春 130023)

**摘 要** 利用模式耦合理论推导出长周期光纤光栅(LPG)温度特性的一般关系式; 通过测试周期为 400~ 600  $\mu\text{m}$  的长周期光纤光栅的温度特性, 确定了芯内导模与被耦合的不同包层模间的热光系数差, 并结合长周期光栅温度特性关系式总结出长周期光栅温度灵敏度与光栅周期和耦合包层模阶次的对应关系; 在理论与实验的基础上, 提出了改善长周期光栅温度稳定性的方法。

**关键词** 长周期, 模式耦合, 包层模, 光纤光栅。

## 1 引 言

自紫外写入布拉格(Bragg)光纤光栅成功制备以来<sup>[1]</sup>, 光纤光栅技术得到了迅速发展, 其中布拉格光纤光栅已经走向生产实用化。而长周期光纤光栅作为近几年新发展起来的一类特殊光栅, 以其宽带宽滤波、极低的背景反射、高灵敏度的温度和应变响应特性和易于批量制造、集成等优点及在光纤通信和光纤传感系统的特殊应用, 受到人们的广泛关注。虽然长周期光纤光栅可以作为高灵敏度的光纤传感器, 但高的温度灵敏度又使其在通信系统中作为带阻滤波器、模式转换器和掺铒光纤放大器(EDFA)增益平滑器的应用造成不利影响, 限制了长周期光栅器件的广泛应用。

为解决长周期光栅的稳定性问题, 有人提出通过平衡纤芯和光纤包层有效折射率对温度的响应来降低温度效应<sup>[2]</sup>, 但这种想法还没有实现。而 John 等人<sup>[3]</sup>通过设计纤芯成份和包层折射指数框架使长周期光栅温度灵敏度降低到 4 nm/100 $^{\circ}\text{C}$ , 最好效果达到 2 nm/100 $^{\circ}\text{C}$ , 然而这种特殊光纤的制作工艺复杂。另外人们采用硼锆共掺光纤制成的光栅温度灵敏度达 0.5 nm/100 $^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>, 但这种光纤与通信光纤的耦合损耗较大。本文在模式耦合理论与实验的基础上, 提出了改善长周期光栅温度稳定性的方法, 大大减小环境温度变化对光栅性能的影响, 提高器件的工作稳定性。

## 2 长周期光纤光栅温度特性的理论分析

### 2.1 模式耦合理论

由模式耦合理论知道, 当光纤内引入某种周期性微扰时, 会引起不同传播模式间的耦

\* 国家重点实验室资助课题。

收稿日期: 1998-09-28; 收到修改稿日期: 1998-12-07

合。当这种微扰的周期在  $60 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$  时, 光纤芯内导模在满足一定条件时会与同方向传播的包层模耦合, 此时, 光纤中因具有该微扰而形成周期光栅。在光纤中传播的  $k$  阶模与  $l$  阶模发生耦合时, 满足如下耦合模方程<sup>[5]</sup>:

$$\frac{dA_k(z)}{dz} = -i \frac{\beta_k}{|\beta_k|} \sum_l \sum_m K_{kl}^{(m)} A_l \exp [i(\beta_k - \beta_l - \frac{2\pi m}{\Lambda})z], \quad (1)$$

式中  $A_k$ 、 $A_l$  为归一化  $k$  阶模与  $l$  阶模的复振幅,  $\beta_k$ 、 $\beta_l$  为  $k$ 、 $l$  阶模的传播常数,  $K_{kl}^{(m)}$  为  $k$  阶与  $l$  阶模的耦合常数 ( $m = 1, 2, 3, \dots$ )。由(1)式可知,  $k$  阶与  $l$  阶模耦合的匹配条件是

$$\int \exp [i(\beta_k - \beta_l - \frac{2\pi m}{\Lambda})z] dz \neq 0, \quad (2)$$

$$\text{即} \quad \beta_k - \beta_l - 2\pi m/\Lambda = 0, \quad (3)$$

对一阶衍射,  $m = 1$ , (3)式变成

$$\beta_k - \beta_l = 2\pi/\Lambda. \quad (4)$$

因此, 在长周期光纤光栅中传播的光纤芯内导模要与同方向传播的包层模耦合, 须满足:

$$\beta_{\text{co}}^{(0,1)} - \beta_{\text{cl}}^{(l,m)} = \frac{2\pi}{\Lambda_{(l,m)}}, \quad (5)$$

式中  $\beta_{\text{co}}^{(0,1)}$  为芯内导模的传播常数,  $\beta_{\text{cl}}^{(l,m)}$  为  $(l, m)$  阶包层模的传播常数,  $\Lambda_{(l,m)}$  为芯内导模耦合到  $(l, m)$  阶包层模时的光栅周期。(5)式即为长周期光栅的相位匹配条件。

由

$$\beta_{\text{co}}^{(0,1)} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{co}}, \quad \beta_{\text{cl}}^{(l,m)} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{cl}}^{(l,m)},$$

(5)式化简为

$$n_{\text{co}}^{(0,1)} - n_{\text{cl}}^{(l,m)} = \frac{\lambda}{\Lambda_{(l,m)}}, \quad (6)$$

式中,  $n_{\text{co}}^{(0,1)}$ 、 $n_{\text{cl}}^{(l,m)}$  分别为芯内导模和  $(l, m)$  阶包层模的有效折射率。

由于包层模模式较多, 同一纤芯内导模可耦合到一系列不同的包层模上; 由于包层模沿光纤轴向传播时, 包层与空气(或外包层)界面的散射及光纤弯曲, 包层模变成辐射模而被迅速衰减, 这样长周期光栅的透射谱是由一系列吸收峰组成, 如图 1 所示。每个吸收峰相应于芯内导模耦合到不同的包层模, 且透过率随耦合包层模阶次的升高而增加。

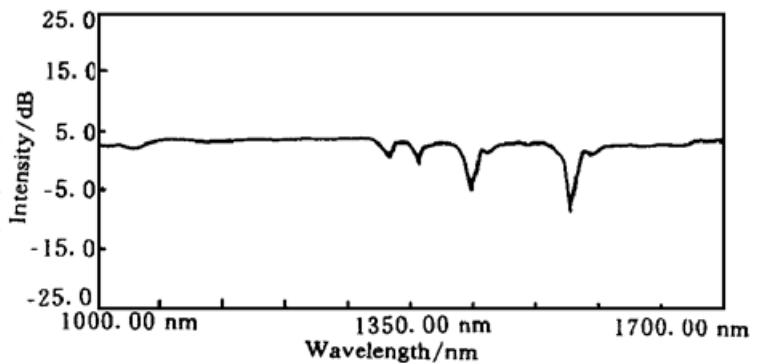


Fig. 1 Transmission spectrum of  $440 \mu\text{m}$  LPG

## 2.2 长周期光栅温度特性分析

当温度变化时, 光栅的栅距  $\Lambda$  和有效折射率都会发生变化, 引起耦合波长漂移。(6)式对温度  $T$  微分, 可得长周期光栅温度特性表示式:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \Lambda \left[ \frac{dn_{\text{co}}^{(0,1)}}{dT} - \frac{dn_{\text{cl}}^{(l,m)}}{dT} \right] + (n_{\text{co}}^{(0,1)} - n_{\text{cl}}^{(l,m)}) \frac{d\Lambda}{dT}. \quad (7)$$

令  $\delta n_{\text{eff}}$  为芯内导模与  $(l, m)$  阶包层模有效折射率差, 即  $\delta n_{\text{eff}} = n_{\text{co}}^{(0,1)} - n_{\text{cl}}^{(l,m)}$ , 并结合相位匹

配条件得出的近似关系  $\frac{d\lambda}{d\Lambda} = n_{co}^{(0,1)} - n_{cl}^{(l,m)}$ , 以及  $\frac{d\Lambda}{\Lambda} = \frac{dL}{L}$ , 可将(7)式改写为

$$\frac{d\lambda}{dT} = \Lambda \left[ \frac{dn_{co}^{(0,1)}}{dT} - \frac{dn_{cl}^{(l,m)}}{dT} \right] + \lambda \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad (8)$$

其中,  $dn_{co}^{(0,1)}/dT$ 、 $dn_{cl}^{(l,m)}/dT$  为芯内导模和  $(l, m)$  阶包层模的热光系数,  $L$  为光栅的长度,  $\alpha = (1/L)dL/dT$  为光纤的热膨胀系数, 对掺锗石英光纤<sup>[6]</sup>,  $\alpha$  一般为  $5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,  $dn_{co}^{(0,1)}/dT = 8.3 \times 10^{-6}$ ,  $dn_{cl}^{(l,m)}/dT$ , 不是定值, 与耦合的包层模阶数有关。由(8)式可见, 长周期光栅由温度造成的耦合波长漂移与光纤类型、光栅周期和被耦合的包层模阶数有关。

### 3 长周期光纤光栅温度特性实验

实验中所用的长周期光纤光栅是利用不同周期的不锈钢幅度掩模板、氢载单模光纤 (SMF-28) 在 248 nm 准分子激光下以  $100 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  的能量密度曝光 5~15 min 制成的。制成后的光栅在  $150^\circ\text{C}$  下退火 24 小时去除残留氢的影响和紫外光照引起的热不稳定性。长周期光栅温度特性测试装置如图 2 所示。

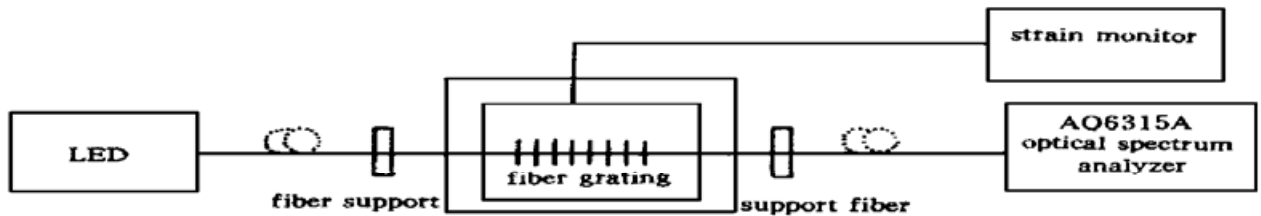


Fig. 2 Measurement of LPG temperature characteristic

发光二极管(LED)中心波长为 1518 nm, 光谱范围覆盖了长周期光栅的带宽。由于长周期光栅对光纤弯曲极为敏感, 为保证测试精度, 将光栅拉直固定在两个支柱上, 同时用应变传感器监测光栅的受力情况, 在光栅不弯曲且不受力的情况下对周期为  $560 \mu\text{m}$ 、 $440 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$  的长周期光纤光栅进行了温度特性测量。逐点记录光谱仪显示的光栅透射谱吸收峰峰值波长和温控仪显示的温度值间的关系。图 3 是周期为  $560 \mu\text{m}$  光栅的芯内导模(LP<sub>01</sub>) 耦合到 LP<sub>01</sub>阶、LP<sub>02</sub>阶和 LP<sub>03</sub>阶包层模的波长漂移与温度关系。图 4 代表  $440 \mu\text{m}$  周期光栅的芯内导模与 LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub>、LP<sub>03</sub>、LP<sub>04</sub>阶包层模耦合时的温度特性关系。图 5 是周期为  $440 \mu\text{m}$  和  $500 \mu\text{m}$  光栅的 LP<sub>03</sub>阶包层模测试结果对比。图 3~ 图 5 中各数据点直线拟合得到单位温度变化

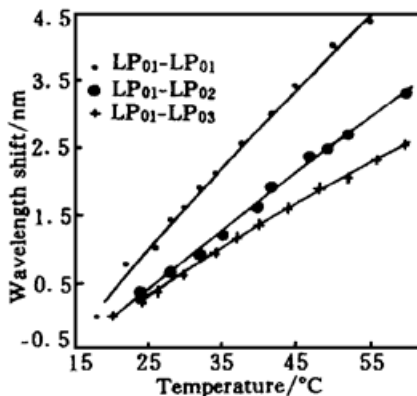


Fig. 3 Relations between temperature variation and wavelength shift for  $560 \mu\text{m}$  grating

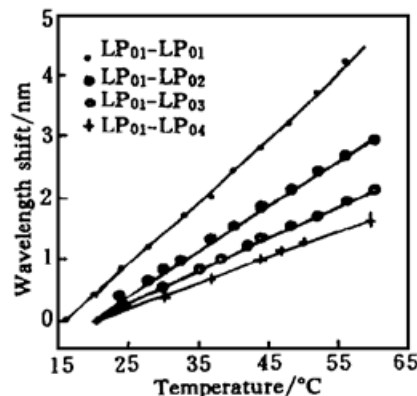


Fig. 4 Relations between temperature variation and wavelength shift for  $440 \mu\text{m}$  grating

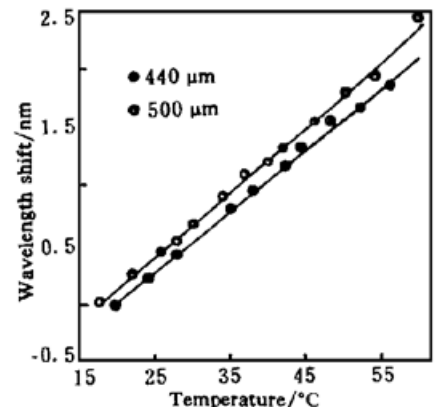


Fig. 5 Comparison wavelength shift and temperature variation of LP<sub>03</sub> cladding for grating of  $500 \mu\text{m}$  and  $440 \mu\text{m}$

引起的波长漂移, 即温度灵敏度见表 1。

Table 1. Relations of temperature sensitivity for LPG with grating periods and cladding mode orders

grating period	temperature sensitivity when guided mode in fiber core coupled to different cladding modes/(nm/°C)			
	LP <sub>01</sub>	LP <sub>02</sub>	LP <sub>03</sub>	LP <sub>04</sub>
560 μm	0.12	0.083	0.063	/
440 μm	0.09	0.066	0.052	0.041
500 μm	/	0.077	0.056	/

#### 4 长周期光纤光栅温度灵敏度与光栅周期和耦合包层模间的对应关系

实验中, 对周期为 440 μm、500 μm 和 560 μm 的光栅进行了测试。由前面的理论分析可知, 要得到完整连续的光栅温度灵敏度与光栅周期和耦合包层模间的对应关系, 关键是确定芯内导模与被耦合的包层模间的热光系数差  $dn_{co}^{(0,1)}/dT - dn_{cl}^{(l,m)}/dT$ 。由于有效折射指数差与光纤的热弹应变有关<sup>[7]</sup>, 这种热弹应变效应在光栅上形成张应变, 引起有效折射指数差  $\delta n_{eff} = n_{co}^{(0,1)} - n_{cl}^{(l,m)}$  减小, 并且高阶模有效折射指数差的减小量比低阶模的大<sup>[8]</sup>, 因此热光系数差随耦合包层模阶次升高而减小。

为确定芯内导模与被耦合的包层模间的热光系数差, 将实验中测得的周期为 560 μm 光栅的 LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub> 阶包层模和周期为 440 μm 光栅的 LP<sub>03</sub>、LP<sub>04</sub> 阶包层模的温度系数代入 (8) 式, 得到分别对应芯内导模耦合到 LP<sub>01</sub>、LP<sub>02</sub>、LP<sub>03</sub> 和 LP<sub>04</sub> 阶包层模的热光系数差的值, 均在  $10^{-7}$  量级。这样, 再将得到的热光系数差值代入 (8) 式, 并利用热光系数差值间的规律性, 则从理论上可计算出芯内导模与 6 个包层模耦合时, 光栅温度系数(温度灵敏度)与光栅周期和包层模阶次的对应关系, 如图 6 所示。

从表 1 和图 6 中都能看到, 对同一耦合模式随光栅周期增加, 其温度系数增大; 同一周期的光栅随耦合包层模阶次升高, 温度系数减小。这说明选择更短周期( $< 200 \mu\text{m}$ ) 的长周期光纤光栅, 并且使其耦合到高阶( $> 5$ ) 包层模上, 就可控制光栅的温度灵敏度小于  $1 \text{ nm}/100^\circ\text{C}$ , 从而降低环境温度变化对长周期光栅器件性能的影响, 提高器件的稳定性。虽然短周期的光栅对弯曲和应变更敏感, 可以将光栅封装在石英管内, 从而消除由弯曲和应变带来的影响, 由于石英与光纤相同的热膨胀系数, 不会改变光栅的温度特性。

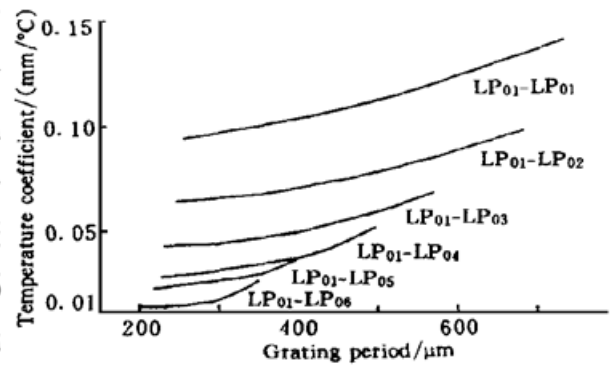


Fig. 6 Theoretical calculated relations of temperature sensitivity for LPG with grating periods and cladding mode orders

**结 论** 本文在理论推导的长周期光栅温度灵敏度关系式基础上, 结合实验测试, 确定了芯内导模与被耦合的包层模间的热光系数差  $dn_{co}^{(0,1)}/dT - dn_{cl}^{(l,m)}/dT$ 。经实验和理论分析发现随耦合包层模阶次提高, 光栅的热光系数差减小, 且各个相邻耦合模( $l, m$ ) 与( $l, m + 1$ ) 之

间的热光系数差呈现出规律性变化;在理论和实验上都证实了光栅周期和包层模阶数都会影响长周期光栅的温度灵敏度。经过理论分析可以清楚看到缩短光栅的周期,使其芯内导模与高阶包层模耦合,是减少长周期光栅温度灵敏度的有效途径,提高器件温度稳定性的较好方法。这样,不仅避免复杂昂贵的恒温装置的使用,而且制作简便、成本低、便于批量生产,为长周期光纤光栅的最终走向实用化提供了一种较为实际的解决方案。

### 参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguide: Application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(6) : 647~ 649
- [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8) : 1442~ 1463
- [3] Digiovanni D J, Judkins J B, Pedrazzani J R *et al.*. Temperature insensitive long-period fiber grating devices. *USA Patent*, S1:1, US5703978, 1997
- [4] Shima K, Himeno K, Sakai T *et al.*. A novel temperature-insensitive long-period fiber gratings. (in Optical Fiber Communication Conference), *OSA Technical Digest Series*, 1997, **6** : 347~ 348
- [5] Ariv A, Yeh P 著. 于荣金, 金锋译. 晶体中的光波. 北京: 科学技术出版社, 1991. 383~ 390
- [6] Takahashi S, Shibata S. Thermal variation of attenuation for optical fiber. *J. Non-crys Solids.*, 1979, **30**(3) : 359~ 370
- [7] Sceats M G, Atkins G R, Poole S B. Photolytic index change in optical fiber. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1993, **23** : 381~ 410
- [8] Limberger H G, Fonjalla P Y, Salathe R P *et al.*. Compaction- and photoelastic-induced index changes in fiber Bragg gratings. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(22) : 3069~ 3071

## Analysis and Improvement of Temperature Stability for Long-Period Fiber Grating

Qin Li      Wei Zhanxong      Wang Qingya      Wei Xin  
Zheng Wei      Zhang Yushu      Gao Dingsan

(Department of Electronics Engineering, Jilin University, Changchun 130023)

(Received 28 September 1998; revised 7 December 1998)

**Abstract** General relation of temperature characteristics for long-period fiber grating (LPG) is obtained from deduction by using mode coupling theory. Thermal-optics coefficient differences of guiding mode in fiber and coupled different cladding mode are determined through measurement of temperature characteristics for LPG with period of 400~ 600  $\mu\text{m}$ . The relations of temperature sensitivity with grating periods and coupled cladding mode orders are summarized combining the formula of temperature characteristics for LPG. The method of improving temperature stability for LPG is presented on the basis of theory along with experiments.

**Key words** long-period, mode coupling, cladding modes, fiber gratings.