

文章编号: 1001-3806(2011)02-0252-03

### 3 包层模型长周期光纤光栅透射谱的温度特性

韦永森<sup>1</sup>, 周春新<sup>1</sup>, 曾庆科<sup>2</sup>, 秦子雄<sup>3</sup>, 万玲玉<sup>4</sup>

(1. 桂林师范高等专科学校 物理与信息技术系, 桂林 541001; 2. 广西师范大学 电子工程学院, 桂林 541004; 3. 广西师范大学 物理科学与技术学院, 桂林 541004; 4. 广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

**摘要:** 为了研究长周期光纤光栅透射谱的温度特性, 采用光纤3层模型进行了仿真研究, 得出了1阶低次包层模与导模耦合时透射谱的变化规律。结果表明, 在低温度范围内, 其透射峰的深度基本不受温度的影响, 不同谐振波长对应不同的温度灵敏度, 次数越高灵敏度越高,  $K_7 = 0.04951\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,  $K_3 = 0.04246\text{nm}/^\circ\text{C}$ , 但同一谐振波长对温度的响应具有良好的线性关系。

**关键词:** 光纤光学; 长周期光纤光栅; 耦合模理论; 透射谱; 温度特性

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.030

### Study on temperature characteristics of the transmission spectra of three-layer model long period fiber gratings

WEI Yong-sen<sup>1</sup>, ZHOU Chun-xin<sup>1</sup>, ZENG Qing-ke<sup>2</sup>, QIN Zi-xiong<sup>3</sup>, WAN Ling-yu<sup>4</sup>

(1. Department of Physics and Information Technology, Guilin Normal College, Guilin 541001, China; 2. College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 3. College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 4. College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to study temperature characteristics of the transmission spectra of long period fiber gratings, simulation was carried out based on the three-layer fiber model, and the change rule of transmission spectra was obtained in the case of coupling between lowest-order cladding modes and the fundamental core mode. It is shown that the depth of harmonic wave is almost independent of temperature within the low temperature range. Different harmonic wave has different temperature sensitivity, the bigger the order, the higher the temperature sensitivity,  $K_7 = 0.04951\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,  $K_3 = 0.04246\text{nm}/^\circ\text{C}$ . But the response the same harmonic wave is linear with temperature.

**Key words:** fiber optics; long period fiber grating; coupled mode theory; transmission spectra; temperature characteristics

### 引言

长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPFG)由于其良好的敏感特性, 在传感器领域发挥着重要作用, 是当前的研究热点之一。基于LPFG对外界环境如压力、温度、浓度等的变化特性已有了部分研究<sup>[1-9]</sup>, 由于温度测量的广泛应用, 因此对温度传感的研究较为重要, 目前对LPFG的温度敏感特性的研究大多限于单波长实验和讨论, 对不同波长的影响规律没有深入研究。本文中利用光纤3层模型理论, 通过仿真研究了长周期光纤光栅不同谐振波长的透射谱的温度性

质, 根据仿真结果对LPFG的温度敏感特性做了规律性探讨, 发现不同谐振波长对温度的灵敏度不同, 但是同一谐振波长对温度的响应呈良好的线性关系, 研究结果对LPFG的应用有一定参考价值。

### 1 理论分析

长周期光纤光栅的理论研究主要采用耦合模理论, 并采用3包层模型<sup>[10-12]</sup>。经过一系列合理的近似以后, 发现纤芯基模和1阶低次包层模的耦合起主要作用, 其长周期光纤光栅耦合方程如下:

$$dA_{co}/dz = ik_{co-co,01-01}A_{co} +$$

$$i \sum_v \frac{m}{2} k_{co-cl,1v-01} A_{cl,v} \exp(-i2\delta_{co-cl,1v-01}z) \quad (1)$$

$$\sum_v \left[ \frac{dA_{cl,v}}{dz} = + i \frac{m}{2} k_{co-cl,1v-01} A_{co} \exp(i2\delta_{co-cl,1v-01}z) \right] \quad (2)$$

$$\delta_{co-cl,1v-01} \equiv (\beta_{co,01} - \beta_{cl,1v} - 2\pi/\Lambda)/2 \quad (3)$$

式中,  $A_{co}$ 为纤芯基模,  $A_{cl,v}$ 为1阶 $v$ 次包层模,  $k_{co-co,01-01}$

基金项目: 广西教育厅科研项目资助项目(200808LX077); 国家自然科学基金资助项目(10964001)

作者简介: 韦永森(1971-), 男, 讲师, 主要从事光纤通信及光纤传感的研究。

E-mail: wys22228@yahoo.com.cn

收稿日期: 2010-05-18; 收到修改稿日期: 2010-09-25

为纤芯基模自耦合系数,  $k_{co-cl,1v-01}$  为纤芯基模与 1 阶  $v$  次包层模的互耦合系数,  $\delta_{co-cl,1v-01}$  是纤芯基模与 1 阶  $v$  次包层模间的调谐系数,  $\beta_{co,01}$  和  $\beta_{cl,1v}$  分别是纤芯导模和 1 阶  $v$  次包层模的传播常数,  $m$  为边缘条纹调制深度,  $\Lambda$  为光栅周期。  $k_{co-co,01-01}$  和  $k_{co-cl,1v-01}$  的表达式如下:

$$k_{co-co,01-01}(z) = \sigma(z)(2\pi/\lambda) \times \frac{n_1^2 b}{n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \left[ 1 + \frac{J_0^2(V\sqrt{1-b})}{J_1^2(V\sqrt{1-b})} \right] \quad (4)$$

$$k_{co-cl,1v-01}(z) = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\pi b}{Z_0 n_2 \sqrt{1+2b\Delta}}} \times \frac{n_1^2 u_1}{u_1^2 - V^2(1-b)/a_1^2} \left( 1 + \frac{\sigma_2 \zeta_0}{n_1^2} \right) \times$$

$$E_{cl,1v} [u_1 J_1(u_1 a_1) J_0(V\sqrt{1-b})/J_1(V\sqrt{1-b}) - (V\sqrt{1-b}/a_1) J_0(u_1 a_1)] \quad (5)$$

式中,真空电磁阻抗  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377\Omega$ ,归一化有效折射率  $b = (n_{co,eff}^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$ ,归一化纤芯包层折射率差  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ ,  $J_0()$  和  $J_1()$  为第 1 类贝塞尔函数,  $u_1^2 = (2\pi/\lambda)^2 (n_1^2 - n_{co,eff}^2)$ ,归一化频率  $V = \frac{2\pi}{\lambda} a_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ ,  $E_{cl,1v}$  为包层模场的归一化常量,  $n_1$  和  $n_2$  分别是纤芯和包层区域的折射率,  $n_{co,eff}$  为基模有效折射率,  $a_1$  为纤芯半径,  $\sigma(z)$  为光栅的缓变包络,对于均匀光栅,其值为常数,  $\zeta_0$  的定义见参考文献[9]。

要求解(1)式和(2)式,需要先求解(3)式~(5)式,如果给出波长、光栅周期和纤芯及包层的折射率和半径,那么未知量就剩下  $E_{cl,1v}$ ,  $\beta_{co,01}$  和  $\beta_{cl,1v}$ 。根据  $\beta = (2\pi/\lambda) n_{eff}$ ,需要先求解纤芯和包层的有效折射率  $n_{co,eff}$ ,  $n_{cl,eff}$  和  $E_{cl,1v}$ 。根据下面包层模传播常数的特征方程以求得  $n_{cl,eff}$ :  $\zeta_0 = \zeta_0'$  (6) 具体形式见参考文献[10]。

根据基模传播常数的特征方程(见下式)可以求得  $n_{co,eff}$ (因为有  $b = (n_{co,eff}^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$ ):

$$V\sqrt{1-b} \frac{J_1(V\sqrt{1-b})}{J_0(V\sqrt{1-b})} = V\sqrt{b} \frac{K_1(V\sqrt{b})}{K_0(V\sqrt{b})} \quad (7)$$

式中,  $K_0()$  和  $K_1()$  为第 2 类修正的贝塞尔函数。

对于归一化常量  $E_{cl,1v}$ ,可以由功率  $P = 1W$  求得(具体见参考文献[3]):

$$P = \frac{1}{2} \text{Re} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\infty r dr \times (E_{cl,r} H_{cl,\phi}^* - H_{cl,r} E_{cl,\phi}^*) = 1W \quad (8)$$

式中,  $E_{cl,r}$  和  $E_{cl,\phi}$  表示 1 阶各次包层模电场径向和幅角方向的分量,  $H_{cl,r}$  和  $H_{cl,\phi}$  表示 1 阶各次包层模磁场径向和幅角方向的分量, \* 表示复数共轭,  $E_{cl,r}$  和  $E_{cl,\phi}$  及  $H_{cl,r}$  和  $H_{cl,\phi}$  的表达式见参考文献[9],其中包含了

归一化常量  $E_{cl,1v}$ 。

将  $n_{co,eff}$  和  $n_{cl,eff}$  及  $E_{cl,1v}$  代入(1)式、(2)式和(3)式,根据边界条件  $A_{co}(z = -L/2) = 1$  和  $A_{cl,v}(z = L/2) = 0$  ( $L$  为光纤光栅的长度)即可求出透射率:

$$T_\lambda = |A_{co}(L/2)|^2 / |A_{co}(-L/2)|^2 \quad (9)$$

温度对透射谱的影响主要表现为谐振波的漂移,这种现象的本质主要是光纤实体受温度影响而其结构参量发生了变化所产生的结果,根据参考文献[8]中的描述,温度的变化影响到了许多参量,显得比较复杂,作者利用仿真手段,不考虑内部细节(忽略的细节不会影响到本文对其规律的研究),仅考虑光纤的结构参量的变化,如光纤的半径、周期、长度等。公式如下:

$$n_1 = n_{10} [1 + \xi_{co}(t - t_0)] \quad (10)$$

$$n_2 = n_{20} [1 + \xi_{cl}(t - t_0)] \quad (11)$$

$$a_1 = a_{10} [1 + \alpha_1(t - t_0)] \quad (12)$$

$$a_2 = a_{20} [1 + \alpha_2(t - t_0)] \quad (13)$$

$$\Lambda = \Lambda_0 [1 + \alpha_3(t - t_0)] \quad (14)$$

式中,  $n_{10}$ ,  $n_{20}$ ,  $a_{10}$ ,  $a_{20}$  和  $\Lambda_0$  是温度在室温  $t_0$  时的纤芯折射率、包层折射率和纤芯半径、包层半径与光栅周期,  $t$  为温度;  $\xi_{co}$  和  $\xi_{cl}$  分别为纤芯和包层材料的热光系数,有  $\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dt}$ ;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为纤芯和包层材料的横向热膨胀系数,  $\alpha_3$  为光纤的纵向热膨胀系数。

## 2 仿真及结果分析

取 Corning SMF-28 光纤参量,其值如下:  $a_{10} = 4.15\mu\text{m}$ ,  $a_{20} = 62.5\mu\text{m}$ ,  $\Lambda_0 = 450\mu\text{m}$ ,  $L_0 = 85 \cdot \Lambda_0 = 3.8\text{cm}$ ,  $n_{10} = 1.4681$ ,  $n_{20} = 1.4628$ ,  $n_3 = 1.33299$ ,  $\xi_{co} = 6.45 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $\xi_{cl} = 6.34 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_1 = 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_2 = 5.52 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_3 = 5.54 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ 。

将上述参量代入(1)式~(14)式,仿真得到透射谱图,图 1 中只取了  $v$  为 1, 3, 5, 7 4 个谐振波透射峰,

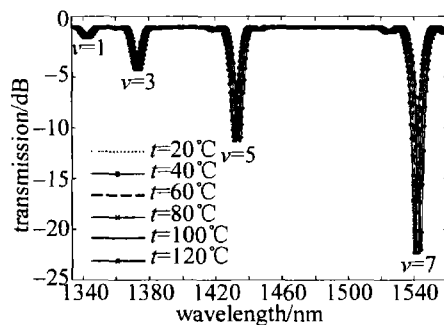


Fig. 1 Transmission spectrum at different temperature

仿真中未考虑材料色散及材料成纤时力学参量的变化,因此仿真结果和实验结果有一定偏差,但是偏差不影响最后的结论。

由图1可以看出,谐振波长随着温度的升高而向长波方向移动,序数不同移动大小也不同,把  $v=3, v=7$  放大到图2,相应的谐振波长变化情况如图3所示。

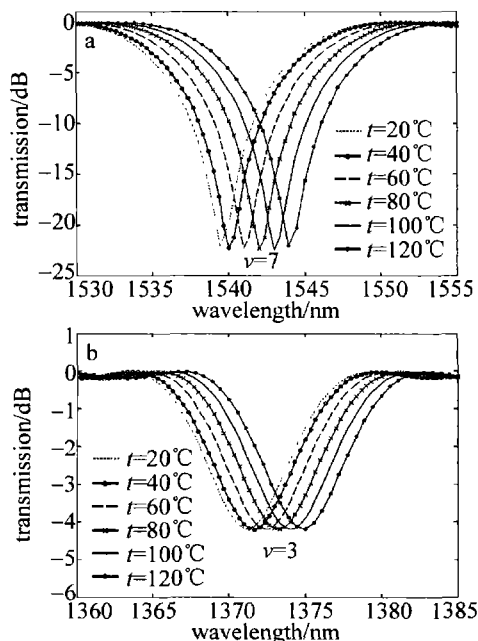


Fig. 2 Enlarged view of transmission spectrum at different temperature of Fig. 1 when  $v=3$  and  $v=7$

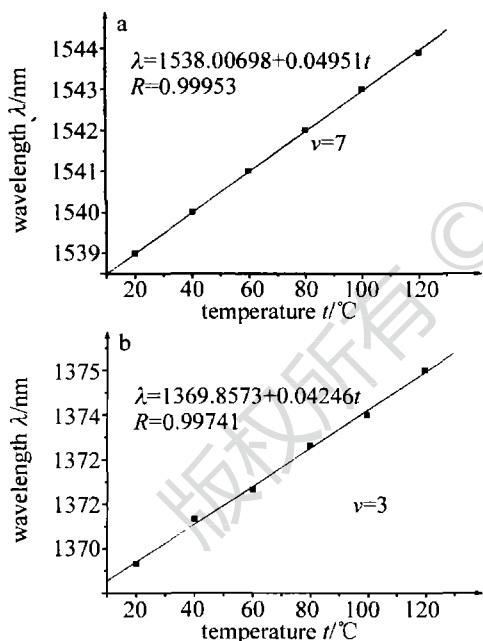


Fig. 3 Relationship between resonant wavelength and temperature

由图2可以看出,  $v=7$  处透射峰的深度要比  $v=3$  处深,且由图3可知,  $v=7$  处的谐振波比  $v=3$  处的谐振波对温度的灵敏度高,都符合如下线性方程:

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + K_v \times t \quad (15)$$

式中,  $K_v$  为温度灵敏度。通过计算得到图3直线的方程如下:

$$\begin{cases} \lambda_7 = 1538.00698 + 0.04951 \times t \\ \lambda_3 = 1369.8573 + 0.04246 \times t \end{cases} \quad (16)$$

即有  $K_7 = 0.04951 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,  $K_3 = 0.04246 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , 显然,  $K_7 >$

$K_3$ 。

### 3 结 论

由上面的分析可知,对于1阶低次耦合模的谐振波,随着次数的增大,其温度灵敏度也随着增大。由图2可看出,在低温度范围内其透射峰的深度基本不受温度的影响,而由图3可知,其谐振波长随温度的变化呈良好的线性,这些特征为长周期光纤光栅作为良好的温度传感器提供了依据,但是由  $K_7 > K_3$  看出,  $v$  的次数越高灵敏度越高,因此,实际用于测量温度的时候还需要测量同一个谐振波长,当然可以测量几个谐振波长求平均。这些都是在低次  $v$  情况下得出来的结论,对高阶  $v$  还需要进一步探讨。本文中的研究结果对长周期光纤光栅温度传感器的应用提供有意义的参考。

### 参 考 文 献

- [1] WANG Y P, WEI J, WANG D N. Unique temperature sensing characteristics of CO<sub>2</sub>-laser-notched long-period fiber gratings[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(10): 1044-1048.
- [2] VENGSAKAR A M, LEMA Y J, JUDKINS J B, et al. Long-period grating as band-rejection filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1): 58-64.
- [3] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [4] SHY X, ALLSOP T, GWANDU B, et al. High-temperature sensitivity of long-period gratings in B-Ge codoped fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 818-820.
- [5] MEI N N, KIN S Ch. Thermal effects on the transmission spectra of long-period fiber gratings[J]. Optics Communications, 2002, 20(8): 321-327.
- [6] GUAN Sh A, YU Q X, SONG Sh D, et al. Theoretical and experimental study on temperature characteristic of long-period fiber grating [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(3): 543-545 (in Chinese).
- [7] HE X F, ZHOU Y, LI J. The non-uniform temperature field influence on spectrum of LPPG[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2008, 26(6): 746-748 (in Chinese).
- [8] ZHANG Z J, SHI W K, GAO K, et al. Thermo-optic coefficient and temperature sensitivity of long-period fiber gratings[J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 525-528 (in Chinese).
- [9] ZHANG Sh L, LI X P, XIE F, et al. Optical fiber grating sensors for height measurement of liquid[J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 7-10 (in Chinese).
- [10] ERDOGAN T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. Journal of the Optical Society of America, 1997, A14(8): 1760-1773.
- [11] HE W X, SHI W K, YE A L, et al. Modes and couplings of long period fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(3): 302-306 (in Chinese).
- [12] CHARLES Y H T, DAVID N P, GAMBLING W A. Modal characteristics of three-layered optical fiber waveguides: a modified approach[J]. Journal of the Optical Society of America, 1989, A6(4): 555-563.