文章编号:1002-2082(2010)04-0632-04

长周期光纤光栅结构参数与透射谱关系的仿真研究

周春新[1]，黄　平[1]，曾庆科[2]，秦子雄[3]

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

摘　要：利用光纤3层模型理论，通过仿真研究发现长周期光纤光栅结构参数与透射谱的变化有规律性关系，给出了一阶低次包层模与导模耦合时透射谱的变化规律。当长周期光纤光栅的纤芯、包层的半径和折射率增大时，谐振波向短波方向漂移；当长周期光纤光栅周期增大时，谐振波向长波方向漂移；当长周期光纤光栅长度增加时，谐振波没有漂移现象，但是其深度减小。通过综合分析发现：谐振波漂移方向比较明确，但是损耗峰深度的变化并没有明显的规律。

关键词：长周期光纤光栅；耦合模理论；有效折射率；透射谱

中图分类号：TN253　　**文献标志码**：A

Simulation study on the relation between the structural parameters and the transmission spectra of a long period fiber grating

ZHOU Chun-xin[1], HUANG Ping[1], ZENG Qing-ke[2], QIN Zi-xiong[3]

(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)

Abstract: Based on the three-layer fiber model, we found that the relation between the structural parameters and the transmission spectra of LPFG is regular variation, and the variation rules of the transmission spectra were presented. This paper only considers the couple between lowest-order cladding modes and the fundamental core mode. When radii and refractive index of fiber core and cladding increase, the resonance wavelengths shift towards shorter wavelength; When grating period increase, the resonance wavelengths shift towards longer wavelength; When grating length increase, the resonance wavelengths have no shift, but its depth decreases. Comprehensive analysis shows that the shift in the resonance wavelengths is clear, but the change of depth doesn't have distinct rules.

Key words: long period fiber grating; coupled mode theory; effective refractive index; transmission spectrum

引言

对于长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPFG)研究的时间并不长，但是研究的广度和深度几乎超出想象，其应用遍及通信、传感等领域[1-2]。本文主要利用耦合模理论[3-5]，采用常用的3层光纤模型，解耦合模方程得到的透射谱与实

收稿日期:2009-11-18；　**修回日期**:2010-01-14
基金项目:广西教育厅科研项目(200808LX077)
作者简介:周春新(1979－)，男，山东潍坊人，硕士研究生，讲师，主要从事光纤传感的研究工作。E-mail: zcx5169@163.com

际符合很好。改变光纤光栅结构参数,观察透射谱的变化,发现透射谱的损耗峰位置、宽度和深度都有不同程度的变化,经过深入分析,阐述了其变化的规律。这对理解LPFG 的特性及设计有重要的参考价值[3]。

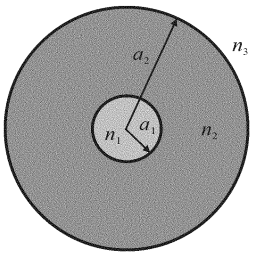

图1　光纤横向截面结构

Fig. 1　Diagram of a cross section of the fiber

1　理论分析

对于理想的光纤,纤芯和包层的模式相互正交,不存在模式间的耦合现象。常见的长周期光纤光栅是在光纤的纤芯写入光栅而成,在纤芯折射率的扰动下,各个模式之间发生了耦合现象,结果是使纤芯透射谱出现一系列损耗峰。经过一系列合理的近似后,得到简化的长周期光纤光栅耦合方程如下[4-5]:

$$\frac{\mathrm{d}A^{\mathrm{co}}}{\mathrm{d}z} = \mathrm{i}k_{01-01}^{\mathrm{co-co}}A^{\mathrm{co}} + \mathrm{i}\sum_{v}\frac{m}{2}k_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}} \cdot A_v^{\mathrm{cl}}\exp(-\mathrm{i}2\delta_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}}z) \tag{1}$$

$$\sum_{v}\left[\frac{\mathrm{d}A_v^{\mathrm{cl}}}{\mathrm{d}z} = +\mathrm{i}\frac{m}{2}k_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}}A^{\mathrm{co}}\exp(+\mathrm{i}2\delta_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}}z)\right] \tag{2}$$

$$\delta_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}} \equiv \frac{1}{2}\left(\beta_{01}^{\mathrm{co}} - \beta_{1v}^{\mathrm{cl}} - \frac{2\pi}{\Lambda}\right) \tag{3}$$

式中:A^{co} 为纤芯基模;A_v^{cl} 为一阶 v 次包层模;$k_{01-01}^{\mathrm{co-co}}$ 为纤芯基模自耦合系数;$k_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}}$ 为纤芯基模与一阶 v 次包层模的互耦合系数;$\delta_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}}$ 是纤芯基模与一阶 v 次包层模间的调谐系数;β_{01}^{co} 和 β_{1v}^{cl} 分别是纤芯导模和一阶 v 次包层模的传播常数;m 为边缘条纹调制深度;Λ 为光栅周期。$k_{01-01}^{\mathrm{co-co}}$ 和 $k_{1v-01}^{\mathrm{co-cl}}$ 的表达式见文献[4]。

根据包层模传播常数的特征方程(4)可以求得 $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cl}}$:

$$\zeta_0 = \zeta_0 \tag{4}$$

根据基模传播常数的特征方程(5)可以求得 $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{co}}$:

$$V\sqrt{1-b}\,\frac{J_1(V\sqrt{1-b})}{J_0(V\sqrt{1-b})} = V\sqrt{b}\,\frac{K_1(V\sqrt{b})}{K_0(V\sqrt{b})} \tag{5}$$

对于归一化常量 E_{1v}^{cl},可以由功率 $P = 1\mathrm{W}$ 求得,

$$P = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\int_0^{2\pi}\mathrm{d}\varphi\int_0^{\infty}r\mathrm{d}r(E_r^{\mathrm{cl}}H_\varphi^{\mathrm{cl}*} - H_r^{\mathrm{cl}*}E_\varphi^{\mathrm{cl}}) = 1\mathrm{W} \tag{6}$$

式中:E_r^{cl} 和 E_φ^{cl} 表示一阶各次包层模电场径向和幅角方向的分量;H_r^{cl} 和 H_φ^{cl} 表示一阶各次包层模磁场径向和幅角方向的分量;$*$ 表示复数共轭。ζ_0,ζ_0',E_r^{cl} 和 E_φ^{cl} 及 H_r^{cl} 和 H_φ^{cl} 的表达式见文献[4]。

将 $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{co}}$ 和 $n_{\mathrm{eff}}^{\mathrm{cl}}$ 及 E_{1v}^{cl} 代入方程(1),(2),(3),根据边界条件 $A^{\mathrm{co}}(z=-L/2)=1$ 和 $A_v^{\mathrm{cl}}(z=L/2)=0$ 即可求出透射率:

$$T_\lambda = |A^{\mathrm{co}}(L/2)|^2/|A^{\mathrm{co}}(-L/2)|^2 \tag{7}$$

2　仿真分析

光纤光栅结构参数主要是纤芯和包层的半径 a_1 和 a_2,周期 Λ 和长度 L,其次是纤芯和包层的折射率 n_1 和 n_2。改变其中一个参数,在其他参数不变的情况下,通过数值仿真绘出其透射谱,需改变的参数被取 2 ~ 3 个不同的值,即可以看出其变化情况。初始结构参数取值为:$a_1 = 4.15\ \mu\mathrm{m}$,$a_2 = 62.5\ \mu\mathrm{m}$,$\Lambda = 450\ \mu\mathrm{m}$,$L = 3.8\ \mathrm{cm}$,$n_1 = 1.4681$,$n_2 = 1.4628$,$n_3 = 1.0$。仿真时仅提取 $v = 1,3,5,7$ 4个低阶奇次耦合模的损耗峰,如图 2(a) 所示。

包层折射率改变时透射谱的变化见图 2(b),由图可知包层折射率增大时谐振波长左移,即向短波方向漂移。纤芯折射率增大时谐振波同样发生左移现象,可由图 2(c) 看出;当光纤光栅的长度变化时,谐振波并不发生漂移,只是深度发生了变化,随着长度的增加,$v = 7$ 的深度不断减小,而 $v = 1,3,5$ 发生不同程度的加深,其规律在此不敢确定。图 2(e) 显示了当光栅周期变化时透射谱的变化,如上述不同,当光栅周期增大时谐振波发生右移现象,即向长波方向漂移,这可以由下式看出[5]:

$$\lambda_{\max}\frac{\lambda_D}{1-\frac{\Lambda}{2\pi}k_{01-01}^{\mathrm{co-co}}} \tag{8}$$

图 2(f)给出了包层半径改变时光纤光栅透射谱的变化情况,当包层半径 a_2 由 52.5 μm 增加到 62.5 μm 时,其谐振波向短波方向移动,次数越大移动越明显,如 $v=5$ 处比 $v=1$ 处漂移距离要大很多,说明谐振峰次数越大越灵敏。纤芯半径的变化将影响到包层,因此从两种情况考虑,一是纤芯半

径变化包层半径不变,二是纤芯半径变化,包层半径也相应变化,如图2(g)和图2(h)所示。图2(g)为第一种情况,纤芯半径增大时包层半径不变,相当于包层变薄,此时的谐振波向短波方向移动,且谐振波峰深度增加,经深入研究发现v不同时谐振波峰深度的变化不一样,此图谐振波峰的加深仅限于$v=7$;第二种情况见图2(h),当纤芯和包层半径都相应增加时,谐振波同样向短波方向移动,但$v=7$的谐振波峰深度变化却没有明显规律,需要更进一步的研究。

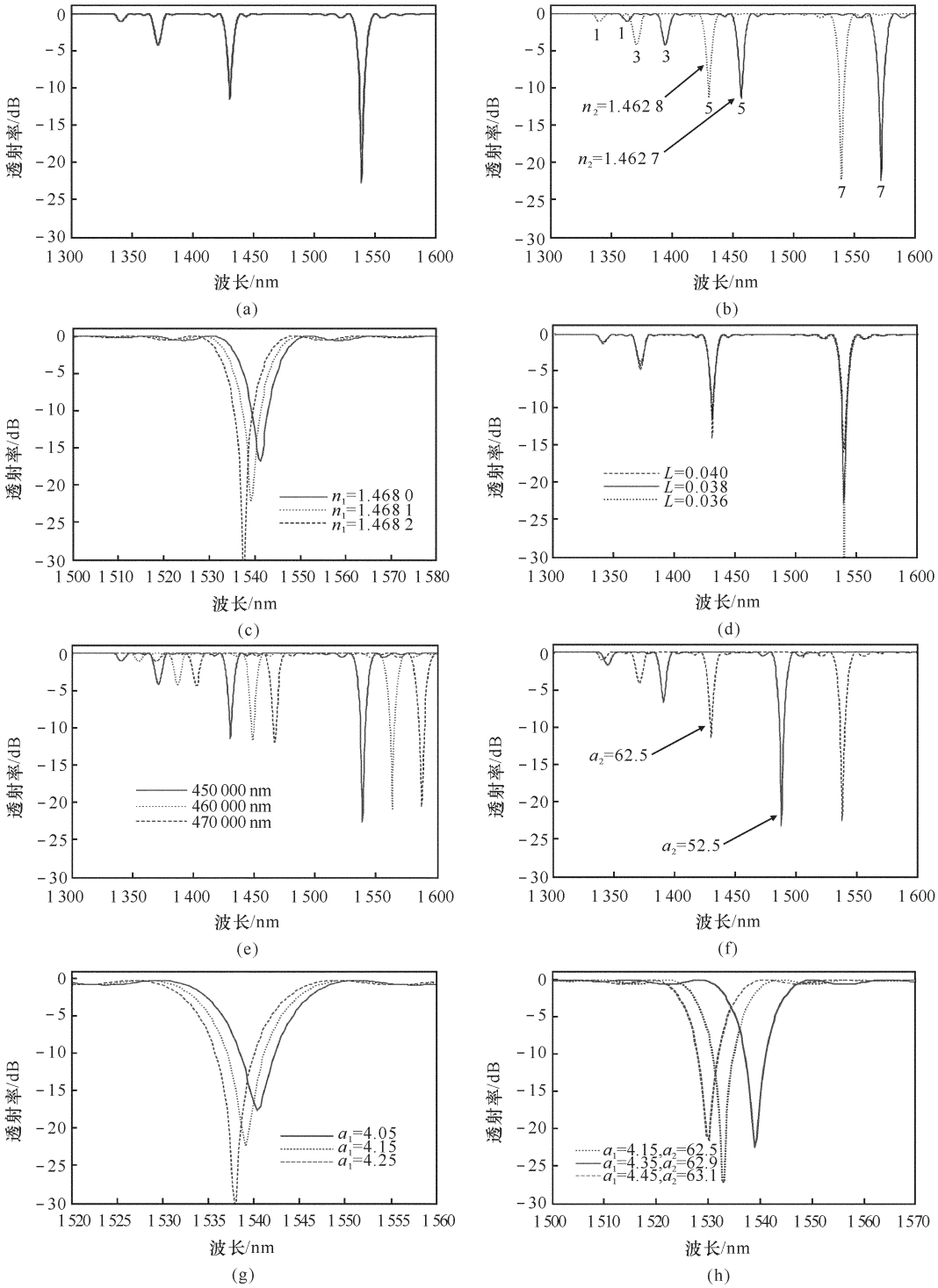

图2　结构参数改变时透射谱的变化

Fig. 2　Variation of transmission spectra for various structural parameters

通过上述分析可以看出,长周期光纤光栅透射谱的损耗峰在结构参数改变时漂移方向都比较明

确,当 a_1,a_2,n_1 和 n_2 增加时,谐振波向短波方向漂移;当光栅周期 Λ 增加时,谐振波向长波方向漂移。但是,本文并没有发现损耗峰的深度很好的变化规律,因此利用损耗峰的漂移量来测量外界参数的变化是可以的,但是利用损耗峰的深度变化来测量外界参数还需要进一步研究,现在对于光纤光栅传感器的研究有向强度检测发展的趋势,所以损耗峰深度的变化规律值得更深入的研究。希望本文的研究结果对长周期光纤光栅的设计和传感应用有一定的指导价值。

3　总结

通过改变光纤结构参数 a_1,a_2,Λ,L,n_1 和 n_2,得到相应的透射谱,经过研究分析发现,这些参数的改变影响到谐振波的位置,当 a_1,a_2,n_1 和 n_2 增加时,谐振波向短波方向漂移;当光栅周期 Λ 增加时,谐振波向长波方向漂移;长度 L 的变化不会使谐振波发生漂移。由图2看出,当光纤结构参数改变时,谐振波峰深度也有所改变,但是规律不详,有待进一步研究。

参考文献:

[1] WANG Y P, JIN W, WANG D N. Unique temperature sensing characteristics of CO_2-laser-notched long-period fiber gratings[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009,47(10):1044-1048.

[2] SAKATA H, SUZUKI S, ITO H, et al. Long-period fiber-grating-based bandpass filter using self-aligned absorptive core mode blocker [J]. Optical Fiber Technology, 2008,14(2):93-96.

[3] 黄桂岭,赵启大,刘松芬,等.长周期光纤光栅透射谱与结构参数关系的研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(5):519-522.
HUANG Gui-ling, ZHAO Qi-da, LIU Song-fen, et al. Study of the relation between the transmission spectra and the structural parameters for a long-period fiber grating[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007,18(5):519-522. (in Chinese with an English abstract)

[4] ERDOGAN T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(8): 1760-1773.

[5] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997,15(8):1277-1294.