

文章编号: 1001-3806(2012)05-0674-03

## 长周期光纤光栅谐振波漂移规律研究

黄平

(桂林师范高等专科学校 物理与信息技术系 桂林 541002)

**摘要:** 为了研究长周期光纤光栅纤芯、包层半径及折射率改变时光栅有效折射率和耦合系数的变化规律,采用理论分析与数值模拟相结合的方法,总结出长周期光纤光栅结构参量与透射谱谐振波漂移的关系。结果表明,当光纤结构参数 $a_1$ , $a_2$ , $n_1$ 和 $n_2$ 增大时,谐振波向短波方向漂移;仅当周期 $\Lambda$ 增大时,谐振波才向长波方向漂移。这一结果对设计长周期光纤光栅是有帮助的。

**关键词:** 光纤光学; 长周期光纤光栅; 耦合模理论; 谐振波; 有效折射率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.025

## Study on the excursion rule of resonance waves of long period fiber gratings

HUANG Ping

(Department of Physics and Information Technology, Guilin Normal College, Guilin 541002, China)

**Abstract:** In order to study the dependence of the effective index and the coupling constant on the radii and refractive index of the fiber core and cladding, the relation between the structural parameters and the change of the resonance wave of the transmission spectra was obtained by means of theoretical analysis and the numerical simulation. The results show when the radii  $a_1$ ,  $a_2$  and refractive index of fiber core and cladding  $n_1$ ,  $n_2$  increase, the resonance wavelengths shift towards shorter wavelengths; when the grating period  $\Lambda$  increases, the resonance wavelengths shift towards longer wavelengths. The conclusion can be used for reference in the design of long period fiber gratings.

**Key words:** fiber optics; long period fiber grating; coupled mode theory; resonance wave; effective refractive index

### 引言

光纤通信的普及,使得光纤相关器件的研究遍布全球。光纤光栅作为无源器件自出现以来就得到了高度重视,与光纤自然结合的特性,使得其在传感及光纤通信中具有及其重要作用,如作传感器、通信滤波器、增益平坦器等<sup>[1-3]</sup>。长周期光纤光栅是纤芯导模受到折射率变化的影响和同向包层模发生耦合的一种透射型光纤光栅,对环境折射率及自身结构参量的改变非常敏感<sup>[4-5]</sup>。

作者基于三包层模型,对光纤结构参数和谐振波的漂移关系进行了数值仿真研究,总结出了光纤结构参数和谐振波的漂移之间的关系和规律,这对长周期光纤光栅的光谱设计有一定的参考价值<sup>[6-7]</sup>。

基金项目: 广西壮族自治区教育厅科研资助项目(200808LX077)

作者简介: 黄平(1971-)男,讲师,硕士,主要从事光纤通信及光纤光栅传感技术的研究。

E-mail: 420920739@qq.com

收稿日期: 2012-01-04; 收到修改稿日期: 2012-02-08

### 1 理论分析

根据耦合模理论<sup>[6-11]</sup>,长周期光纤光栅耦合方程如下:

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

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

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

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

式中 $A_{co}$ 为纤芯基模(下标 $co$ 表示纤芯, $cl$ 表示包层), $A_{1v,cl}$ 为1阶 $v$ 次包层模, $k_{01-01,co-co}$ 为纤芯基模自耦合系数, $k_{1v-01,co-cl}$ 为纤芯基模与1阶 $v$ 次包层模的互耦合系数, $\delta_{1v-01,co-cl}$ 是纤芯基模与1阶 $v$ 次包层模间的调谐系数。 $\beta_{01,co}$ 和 $\beta_{1v,cl}$ 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, $z$ 为沿光纤轴向。 $k_{01-01,co-co}$ 和 $k_{1v-01,co-cl}$ 的表达式如下:

$$k_{01-01,co-co}(z) = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_1^2 b}{n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \times$$

$$\left[ 1 + \frac{J_0^2(\nu\sqrt{1-b})}{J_1^2(\nu\sqrt{1-b})} \right] \quad (4)$$

$$k_{01-01,co-eo}(z) = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \times \\ \sqrt{\frac{\pi b}{Z_0 n_2 \sqrt{1+2b\Delta}}} \frac{n_1^2 u_1}{u_1^2 - \frac{\nu^2(1-b)}{a_1^2}} \left( 1 + \frac{\sigma_2 \zeta_0}{n_1^2} \right) \times \\ E_{1v,cl} \left[ u_1 J_1(u_1 a_1) \frac{J_0(\nu\sqrt{1-b})}{J_1(\nu\sqrt{1-b})} - \right. \\ \left. \frac{\nu\sqrt{1-b}}{a_1} J_0(u_1 a_1) \right] \quad (5)$$

式中  $J_0$ 、 $J_1$  为第 1 类贝塞尔函数,  $u_1^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_{eff,co}^2)$ ,  $\lambda$  为波长,  $a_1$  为纤芯半径, 真空电磁阻抗  $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377\Omega$ ,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\epsilon_0$  为真空介电常数, 归一化有效折射率  $b = \frac{n_{eff,co}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$ , 归一化纤芯包层折射率差  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ , 归一化频率  $\nu = \frac{2\pi}{\lambda} a_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ ,  $E_{1v,cl}$

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,  $n_{eff,co}$  为基模有效折射率,  $\sigma(z)$  为光栅的缓变包络, 对于均匀光栅, 其值为常数。参量  $\sigma_2$  和  $\zeta_0$  的具体定义参见参考文献 [11]。

谐振波的位置由下式可以给出:

$$\delta_{1v-01,co-eo} + \frac{1}{2} k_{01-01,co-eo} = 0 \quad (6)$$

由(3)式和(6)式即可求出谐振波所在位置:

$$\lambda_{max} = \frac{(n_{eff,co} - n_{eff,cl}) \Lambda}{1 - \frac{\Lambda}{2\pi} k_{01-01,co-eo}} = \\ \frac{\Delta n_{eff} \Lambda}{1 - \frac{\Lambda}{2\pi} k_{01-01,co-eo}} = \frac{\lambda'}{1 - \frac{\Lambda}{2\pi} k_{01-01,co-eo}} \quad (7)$$

式中  $n_{eff,cl}$  表示包层模式有效折射率,  $\Delta n_{eff} = n_{eff,co} - n_{eff,cl}$  为纤芯导模与包层模的有效折射率差,  $\lambda' = \Delta n_{eff} \Lambda$  为有效折射率变化量。

## 2 数值计算结果及分析

根据(7)式可以得知, 谐振波的位置和  $n_{eff,co}$ ,  $n_{eff,cl}$ ,  $\Lambda$ ,  $k_{01-01,co-eo}$  等有关, 而它们又和光栅的结构参量  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\Lambda$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  等有关, 如果其它参量不变, 只改变其中一个参量, 那么  $\lambda_{max}$  就可能发生相应的变化。以下所有图通过仿真得到, 只给出了变化比较明显的参量的图。基本参量初始值为: 纤芯半径  $a_1 = 4.15\mu m$ , 包

层半径  $a_2 = 62.5\mu m$ , 光栅周期  $\Lambda = 450\mu m$ , 光栅长度  $L = 3.8cm$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.4681$ , 包层折射率  $n_2 = 1.4628$ , 环境折射率  $n_3 = 1.0$ 。

由图 1 和图 2 可知, 纤芯参量  $a_1$ ,  $n_1$  改变时, 纤芯自耦合系数  $k_{01-01,co-eo}$  变化比较明显, 且随着  $a_1$  和  $n_1$  的增大而减小, 由(7)式可以知道  $\lambda_{max}$  将向短波方向漂移。图 3 和图 4 表明, 包层参量  $a_2$  和  $n_2$  改变时, 包层模式有效折射率的变化最为明显, 且随其值的增加而增加, 由(7)式可得出  $\lambda_{max}$  将向短波方向漂移。由图 5 可见, 随着周期的增加, 谐振波向长波方

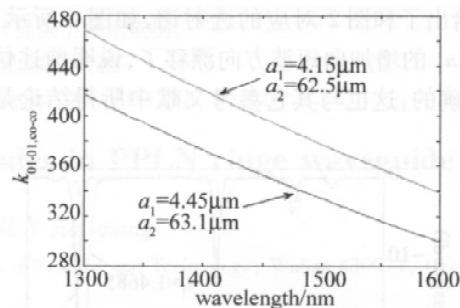


Fig. 1 Variation of  $k_{01-01,co-eo}$  for various core radii

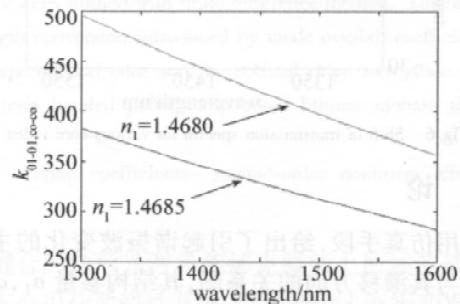


Fig. 2 Variation of  $k_{01-01,co-eo}$  for various core index

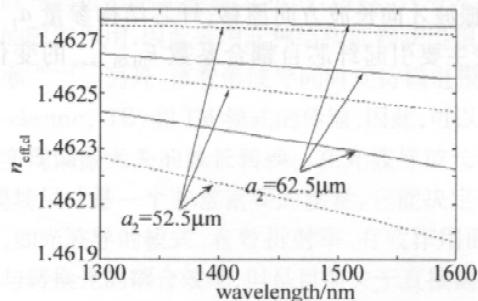


Fig. 3 Variation of  $n_{eff,cl}$  for various cladding radii

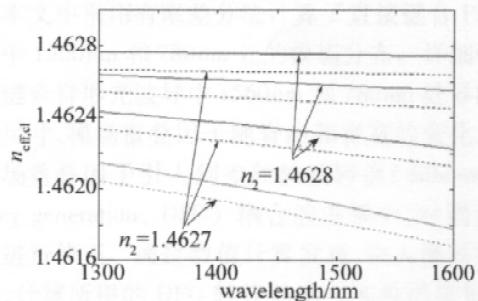


Fig. 4 Variation of  $n_{eff,cl}$  for various cladding index

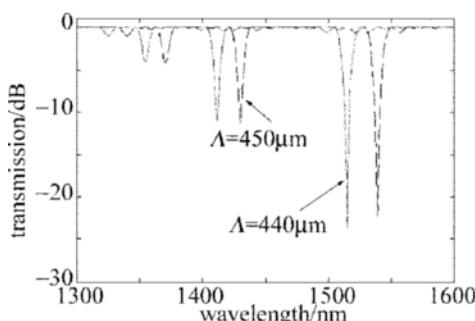


Fig. 5 Shift of transmission spectra for various period

向漂移和(7)式吻合得很好。为了验证上述结果的正确,给出了和图2对应的透射谱,如图6所示,谐振波随着 $n_1$ 的增加向短波方向漂移了,说明前述仿真结论是正确的,这也与其它参考文献中所得结论是一致的<sup>[11]</sup>。

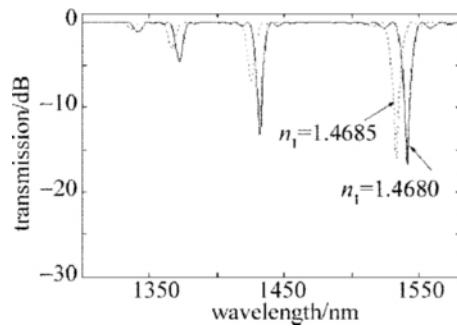


Fig. 6 Shift of transmission spectra for various core index

### 3 结 论

利用仿真手段,给出了引起谐振波变化的主要结构参数与其漂移方向的关系图,其结构参数 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 增大时,谐振波向短波方向漂移,仅当周期 $\Lambda$ 增大时,谐振波才向长波方向漂移;纤芯结构参数 $a_1$ 和 $n_1$ 的改变主要引起纤芯自耦合系数 $k_{01-01_{co-co}}$ 的变化;包

层结构参数 $a_2$ 和 $n_2$ 的改变主要引起包层模式有效折射率 $n_{eff,cl}$ 的变化。这对设计和制作长周期光纤光栅有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] WANG Y P , JIN W , 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] 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] WAN L B , ZHANG B M , WANG D F , et al. A kind of fiber Bragg grating strain sensor with jacket [J]. Laser Technology , 2002 , 26 ( 5 ) : 385-387( in Chinese ).
- [4] HUANG G L , ZHAO Q D , LIU Sh F. Study of the relation between the transmission spectra and the structural parameter for a long period fiber grating [J]. Journal of Optoelectronics•Laser 2007 , 18( 5 ) : 519-522( in Chinese ).
- [5] ZHOU Ch X , HUANG P , ZENG Q K , et al. Simulation study on the relation between the structural parameters and the transmission spectra of a long period fiber grating [J]. Journal of Applied Optics 2010 , 31 ( 4 ) : 632-635( in Chinese ).
- [6] 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.
- [7] XIAO W Q , PENG J. Numerical analysis and design of superimposed multi-wavelength fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology , 2007 , 31( 3 ) : 235-237( in Chinese ).
- [8] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology , 1997 , 15( 8 ) : 1277-1294.
- [9] HE W X , SHI W K , YE A L. Modes and couplings of long period fiber grating [J]. Acta Optica Sinica 2003 , 23( 3 ) : 302-306( in Chinese ).
- [10] JIA H Zh , LI Y L , HU M L. Fabrication methods of fiber gratings [J]. Laser Technology 2001 , 25( 1 ) : 23-26( in Chinese ).
- [11] RAO M H , HE Zh J , YANG G L. The advance of polarization control method to ultraviolet-written Bragg gratings [J]. Laser Technology , 2004 , 28( 1 ) : 61-64( in Chinese ).