

# 长周期光纤光栅包层模特性及其对传输谱的影响\*

崔春雷 刘伟平\*\* 黄红斌 陈舜儿 刘 敏

(暨南大学电子工程系, 广州 510632)

**摘 要** 从模式耦合理论出发, 用数值计算的方法分析了长周期光纤光栅的包层模中各不同阶次模式的有效折射率及其交/直流耦合系数随波长以及阶次的变化规律. 研究发现包层膜有效折射率、直流耦合系数及奇数阶次的交流耦合系数都随着波长的增加而减小. 而阶次高的模式对应的有效折射率以及奇数阶交流耦合系数随波长的变化速率较之低阶次的来说要大. 进一步分析了直流耦合系数对谐振峰值位置的影响, 并且揭示了相邻谐振波长的峰值位置之差随波长而逐渐增大的原因.

**关键词** 长周期光纤光栅; 包层模; 有效折射率; 耦合系数; 谐振波长

**中图分类号** TN929; TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

对于光纤光栅目前研究较多的是 Bragg 光栅和长周期光栅(LPGF). 对于 Bragg 光栅的理论研究已相当成熟<sup>[1,2]</sup>, 其应用也相当广泛<sup>[3,4]</sup>. 所以目前长周期光栅逐渐成为人们研究的新热点. 长周期光栅的模式耦合主要是发生在纤芯基模与同向各阶次包层模式之间的耦合, 其周期通常为几百个  $\mu\text{m}$ . 长周期光纤光栅的透射谱具有多峰值的特点, 并且损耗峰值的带宽远大于短周期的 Bragg 光栅, 具有理想的带阻滤波特性, 所以长周期光纤光栅常用于光纤滤波器<sup>[5]</sup>、EDFA 增益平坦器<sup>[6]</sup> 光纤传感器等器件<sup>[7]</sup>、以及色散补偿. 在分析长周期光纤光栅的透射谱时会发现与包层模相关的交直流耦合系数以及包层模有效折射率都会对谐振峰值有影响, 所以对与包层模相关的各个参数(如交流耦合系数、直流耦合系数及包层有效折射率)的分析和研究就显得非常必要.

关于包层模的交流耦合系数  $k(z)$  的研究已有相关报道<sup>[8]</sup>, 本文在用数值分析的方法分析了包层膜有效折射率的同时重点分析了直流耦合系数的特点以及其对传输谱谐振峰值位置的影响.

## 1 包层模各参数的数值分析

### 1.1 包层模有效折射率的分析

根据耦合模理论, 对于长周期光纤光栅其一阶各次包层模的本征方程为<sup>[8]</sup>

$$\zeta_0 = \{u_2 [JK - \sigma_1 \sigma_2 u_{21} u_{32} / (n_2^2 a_1 a_2)] p(a_2) -$$

$$Kq(a) + Jr(a_2) - s(a_2) / u_2\} / \{-u_2 [(u_{32} / n_2^2 a_2) J - (u_{21} / n_1^2 a_1)] p(a_2) + (u_{32} / n_2^2 a_2) q(a_2) + (u_{21} / n_1^2 a_2) \cdot r(a_2)\} \quad (1)$$

$$\zeta_1 = \{u_2 [(u_{32} / a_2) J - (n_3^2 u_{21} / n_2^2 a_1) K] p(a_2) - (u_{32} / a_2) q(a_2) - (u_{21} / a_1) r(a_2)\} / \{u_2 [(n_3^2 / n_2^2) JK + \sigma_1 \sigma_2 u_{21} u_{32} / (n_2^2 a_1 a_2)] p(a_2) - (n_3^2 / n_1^2) Kq(a_2) + Jr(a_2) - (n_2^2 / n_1^2 u_2) s(a_2)\} \times \sigma_1 \quad (2)$$

式(1)、(2)中参数及其具体表达式见文献[8]、[9].

根据式(1)、(2), 运用 MATLAB6.0 对超越方程  $\zeta_0 = \zeta_1$  进行数值求解可以得到在波长  $\lambda = 1.62 \mu\text{m}$  处的各阶包层模有效折射率  $n_{\text{eff}}^{(l)}(\nu)$  以及交流和直流耦合系数如表 1. 仿真时用 Coning SMF-28 单模光纤为仿真对象, 其参数:  $n_1 = 1.5321$ ;  $n_2 = 1.5265$ ;  $n_{31} = 1$ ; 纤芯半径  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ ; 包层半径  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ . 设定光栅的周期为  $\Lambda = 390 \mu\text{m}$ ; 紫外照射加入的微扰的平均值为  $\sigma(z) = 0.0002$ ; 光栅长度为  $L = 2 \text{cm}$ .

表 1 给出了在波长为 1620 nm 处各阶次模式的有效折射率、交流耦合系数、直流耦合系数随阶次的数值变化规律.

表 1 包层模各参数值与模序的关系

阶次	模式	$n_{\text{eff}}^{(l)}(\nu)$	$k_{\text{eff}}^{(l)} \times 10^{-5}$	$\Delta_{\text{CL-CO}}^{(l)} \times 10^{-2}$
1	HE11	1.52644	0.2644	-0.2603
2	EH11	1.52635	0.0186	-0.2427
3	HE12	1.52625	1.7035	-0.2235
4	EH12	1.52610	0.0443	-0.1944
5	HE13	1.52593	3.9088	-0.1618
6	EH13	1.52574	0.0768	-0.1249
7	HE14	1.52549	5.6721	-0.0758
8	EH14	1.52527	0.1161	-0.0342
9	HE15	1.52492	6.9093	0.3353
10	EH15	1.52470	0.1653	0.0773

图 1 为对有效折射率进行仿真后的各阶包层模有效折射率随波长的变化曲线. 当波长固定时, 有

\* 广东省自然科学基金(编号:010378)和广州市科技局科技攻关项目(编号:2003Z3-D0151)资助

\*\* Tel:020-85228228 Email:wpl@jnu.edu.cn

收稿日期:2005-04-11

效折射率随阶数的增加而下降,且相邻的 HE<sub>1v</sub> 和 EH<sub>1v</sub> 有效折射率曲线之间的纵向距离较接近,而相邻的 HE<sub>1v</sub> 和 HE<sub>1(v+1)</sub> 之间的距离则随着阶数的增加而增大. 并且由图可见不同阶次的包层有效折射率会随波长的增加而减小,且阶次越大的模对应的有效折射率的下降速度也将越快. 图 1 的结论和文献[8]中相关结论是一致的.

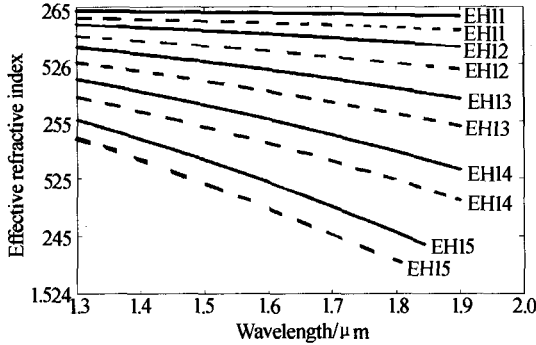


图 1 各阶包层模有效折射率与波长的关系  
Fig. 1 Relationship between effective refractive index and wavelength of different order

1.2 交流耦合系数的数值分析

在包层模之间的耦合系数可以忽略的情况下<sup>[10]</sup>,纤芯基模和包层模耦合的耦合系数公式为

$$k_{1V-01}^{CL-CO}(z) = \frac{\omega \epsilon n_1^2 \sigma(z)}{2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int r (E_r^{cl} \overline{E_r^{co}} + E_\varphi^{cl} \overline{E_\varphi^{co}}) dr \quad (3)$$

文献[8]修正了文献[9]中的公式后得到耦合公式为

$$k_{1V-01}^{CL-CO}(z) = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{\pi b}{Z_0 n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \right]^{1/2} \frac{n_1 u_1 a_1}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{\sigma_2 \zeta_0}{n_1^2} \right] E_{cl}^{1V} \frac{[J_0^2(u_1 a_1) + J_1^2(u_1 a_1)]}{J_1(u_1 a_1)} \quad (4)$$

式中  $E_{cl}^{1V}$  为归一化的包层模式电场参量,可通过求解光纤的归一化功率模型

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1 \quad (5)$$

求得<sup>[9]</sup>,式中  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  分别是纤芯、包层、涂敷层的光功率. 求出  $E_{cl}^{1V}$  后代入式(4)可以求的  $k_{1V-01}^{CL-CO}(z)$  的具体数值. 经过数值计算可得到表 1 所示的各阶次交流耦合系数.

图 2 为一阶各次包层模对应的交流耦合系数随波长的变化关系. 从图中可以看出波长在 1.3 μm 到 2.0 μm 的范围之内,一阶各次包层模对应的耦合系数  $k_{1V-01}^{CL-CO}$  会随波长的增大而减小,且各阶次交流耦合系数的下降趋势会随着波长的增加而减缓,即在短波长段其下降速度很快,而在长波长处其变化较缓慢. 另外,阶次越高其所对应的交流耦合系数随波长的变化越显著,如一阶 9 次模对应的交流耦合系数其在 1.3 μm 到 2.0 μm 之间的耦合系数的变化超过 0.4;而低阶次的(如 1 次、3 次)的交流耦合系数则随波长的变化幅度很小,可以近似认为其在图示的波长范围内为常量.

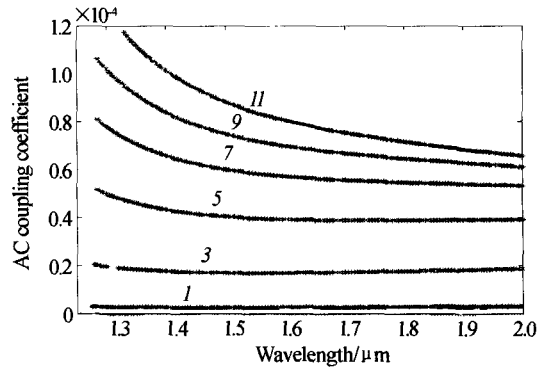


图 2 一阶奇数次交流模耦合系数随波长的变化关系  
Fig. 2 Relationship between “AC” coupling coefficients and wavelength of odd order

而当波长固定的时候通过研究交流耦合系数随阶次的变化可以发现在某一个波长处奇数阶(HE 模)对应的耦合系数远大于偶数阶(EH 模)对应的耦合系数,其随阶数的变化规律见图 3.

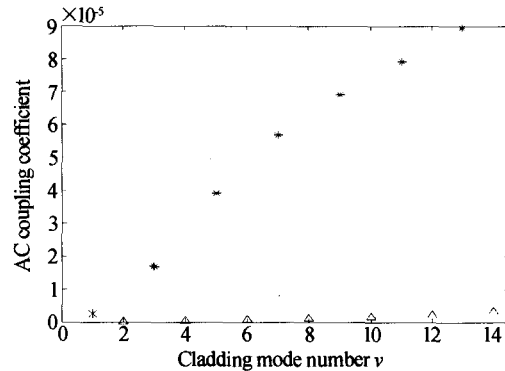


图 3 不同阶耦合系数随阶次的变化关系  
Fig. 3 Relationship between coupling coefficients and different orders

此图为在波长为 1.62 μm 处各阶包层模耦合系数随阶次的变化规律图,由图可以看出奇数阶(HE 模)的耦合系数远大于偶数阶(EH 模)对应的耦合系数. 此图的结论和文献[8,9]相应的结论是一致的. 图中“星号”对应奇数阶,“三角号”对应偶数阶.

1.3 直流耦合系数的数值分析及其对谐振波长的影响

在式(1)、(2)中的直流耦合系数  $\hat{\sigma}$  为

$$\hat{\sigma} = \delta_{1V-10}^{cl-co} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz} \quad (6)$$

式中

$$\delta_{1V-20}^{cl-co} = \frac{1}{2} \left( \beta_{01}^{co} - \beta_{1V}^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) \quad (7)$$

式(7)是基模和包层模耦合的相位失配度;  $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$  分别为纤芯基模之间的自耦合系数和,包层模之间的自耦合系数. 其中纤芯基模自耦合系数由文献[11]可知为

$$\sigma_{11}(\lambda) = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_1^2 b}{n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \left[ 1 + \frac{J_0^2(V\sqrt{1-b})}{J_1^2(V\sqrt{1-b})} \right] \quad (8)$$

式中:  $V = (2\pi/\lambda) a_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  为归一化频率;  $b = \frac{(n_{\text{eff}}^{\text{co}})^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$  为归一化有效折射率;  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$  为归一化纤芯包层折射率差; 由于  $\sigma_{22} \ll \sigma_{11}$  [12], 为了简单起见本文只研究非啁啾的光栅即认为  $\frac{d\phi}{dz} = 0$ ; 所以在忽略  $\sigma_{22}$  和啁啾时可以把式(6)近似为

$$\hat{\sigma} = \delta_{1V}^{\text{cl-co}} + \frac{\sigma_{11}}{2} = \frac{1}{2} \left( \beta_{\text{cl}}^{\text{co}} - \beta_V^{\text{cl}} - \frac{2\pi}{\Delta} \right) + \sigma(z) \frac{\pi}{\lambda} \frac{n_1^2 b}{n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \left[ 1 + \frac{J_0^2(V\sqrt{1-b})}{J_1^2(V\sqrt{1-b})} \right] \quad (9)$$

由耦合条件可知当  $\hat{\sigma} = 0$  即  $\delta_{1V}^{\text{cl-co}} + \frac{\sigma_{11}}{2} = 0$  时纤芯基模与一阶  $v$  次包层模之间发生耦合。

图 4 为对式(9)进行数值仿真后所得各阶次直流耦合系数随波长的变化图(输入数据与求有效折射率时相同)。图中从下到上依次为 1 次模到 10 次模分别对应的直流耦合系数随波长的变化曲线。

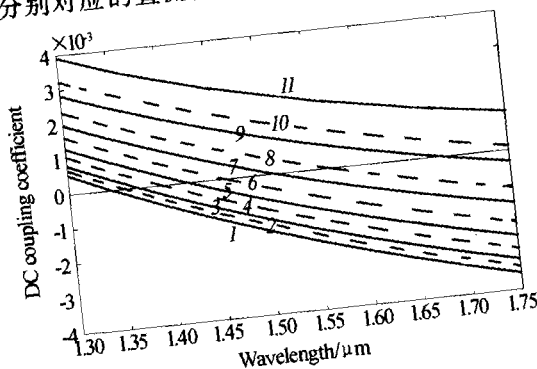


图 4 直流耦合系数随波长的变化关系  
Fig. 4 Relationship between "DC" coupling coefficients and wavelength

从图 4 中可看到他们都经过零点, 并且从图中可以看出相邻零点的距离随阶次是依次增大的, 且每一个过零点对应的横坐标(即波长)都是这一阶次相对应的谐振波长的位置; 但是在偶数阶次(既 EH 模)处的交流耦合系数  $k_{1V}^{\text{cl-co}}(z)$  的值远小于在奇数阶(既 HE 模)处的交流耦合系数, 所以根据文献 [12] 中式(38)、(39)可以看出最终在传输图谱上纤芯导模和奇数阶包层模发生的谐振峰值比纤芯导模和偶数阶包层模发生的谐振峰值要明显得多。

图 5 则为采用数值计算的方法所求的具体的透射谱(仿真参数与求有效折射率时相同), 这里计算了从 1300 nm 到 1750 nm 之间的透射谱, 从左到右的 5 个明显的峰分别为 1、3、5、7、9 次包层模和纤芯基模的耦合峰。

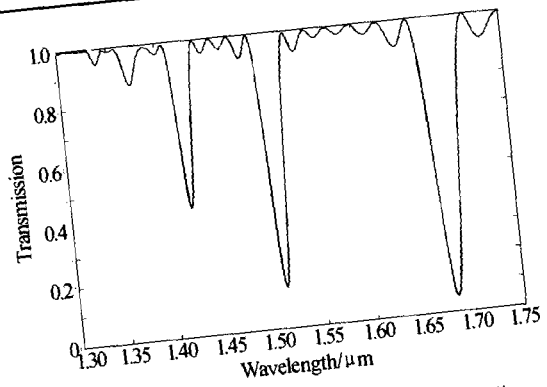


图 5 均匀非啁啾长周期光纤光栅的透射谱  
Fig. 5 Transmission spectrum of LPFGs

分别观察图 4 和图 5, 可以明显看出图 4 中各阶次的直流耦合系数(其中的实线对应奇数次模)过横轴零点时所对应的波长和图 5 中各阶次耦合峰值横轴零点时所对应的波长和图 5 中各阶次耦合峰值处对应的谐振波长的位置是相同的。并且可以看到图 4 中相邻的实线(即奇数阶的 HE 模)的过零点之间的距离随着阶次的增大而加大, 对应的图 5 则相应地反映出谐振峰值之间的距离也随着阶次的增大而加大。

## 2 结论

以模式耦合理论为依据, 以数值仿真作为研究手段文章研究了长周期光纤光栅包层模各参数的特性, 分析了长周期光纤光栅的包层模有效折射率以及直流耦合系数和交流耦合系数随波长及模序的变化关系。实验揭示了直流耦合系数与谐振峰值位置之间的对应关系; 揭示了长周期光纤光栅相邻谐振峰值的位置之差也随波长而逐渐增大的内在原因。

这对于长周期光纤光栅及其相关器件的设计和制造起到了一定的理论上的指导作用。

## 参考文献

- 1 刘伟平, 杜戈, 廖常俊, 等. DWDM 系统光纤光栅分插复用器的设计与实现. 通信学报, 2002, 23(12): 8~15  
Liu W P, Du G, Liao C J, et al. Journal on Communications, 2002, 23(12): 8~15
- 2 李学易, 刘伟平, 黄红斌, 等. 光源线宽和色散对 DWDM 通信系统光纤光栅滤波器的码率限制. 光子学报, 2003, 32(11): 1355~1358  
Li X Y, Liu W P, Huang H B, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(11): 1355~1358
- 3 Chen Jinhua, Zheng Huifang, Fang Xiaohui. Spectr phase optical CDMA coding based on step chirped fit Bragg gratings. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 4~423
- 4 刘丽辉, 赵启大, 张昊, 等. 双波长高灵敏度 Bragg 光栅压力传感器. 光子学报, 2005, 34(2): 319~322  
Liu L M, Zhao Q D, Zhang H, et al. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(2): 319~322

- 5 陈晓峰,刘伟平,杜戈.长周期光纤光栅(LPG)均衡滤波器在光纤放大器中的应用.光通信技术,2002,26(3):42~45  
Chen X F, Liu W P, Du G. *Optical Communication Technology*, 2002, 26(3):42~45
- 6 姜莉,张东生,袁树忠.长周期光纤光栅光谱控制及其在EDFA增益平坦中的应用.光子学报,2004,33(7):810~813  
Jiang L, Zhang D S, Yuan S Z. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7):810~813
- 7 Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J Light Wave Tech*, 1996, 14(1):58~64
- 8 何万迅,施文康,叶爱伦.长周期光纤光栅模式与耦合的研究.光学学报,2003,23(3):302~306  
He W X, She W K, Ye A L. *Acta Optic Sinica*, 2003, 23(3):302~306
- 9 Erdogan T. Cladding mode resonances in short and long period fiber grating filters. *J Optical Society of America A*, 1997, 14(8):1760~1773
- 10 张自嘉,施文康. EH包层模互耦合系数对长周期光纤光栅谱特性的影响.上海交通大学学报,2004,38(2):220~223  
Zhang Z J, Shi W K. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2004, 38(2):220~223
- 11 何万迅,施文康.模式耦合理论在圆周对称长周期光纤光栅建模中的应用.光学技术,2002,28(2):155~157  
He W X, Shi W K. *Optical Technique*, 2002, 28(2):155~157
- 12 Erdogan T. Fiber grating spectra. *J Lightwave Tech*, 1997, 15(8):1277~1294

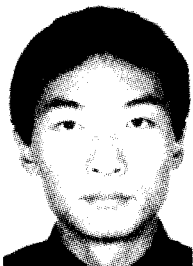
## Cladding Mode's Characteristic and Its Affects on Transmission Spectrum of Long Period Fiber Gratings

Cui Chunlei, Liu Weiping, Huang Hongbin, Chen Shuner, Liu Mi  
*Department of Electronics Engineering, Ji Nan University, Guangzhou 510632*

Received date:2005-04-11

**Abstract** Based on the coupling-mode theory, the changing relations of the effective refractive index and its AC/DC coupling coefficient in different order of cladding modes in long period gratings, versus the varying of wavelength and the order, are numerically calculated and analyzed. It is revealed that the effective refractive index and the DC coupling coefficient, as well as the AC coupling coefficient of odd order modes, will be decreased with the increase in wavelengths. It is also shown that changing rates of the effective refractive index and the ac coupling coefficient of odd order modes corresponding to higher orders are bigger than that corresponding to lower orders. The effects of DC coupling coefficient on the resonant wavelength peak are further analyzed, and the reason that the difference between adjacent resonant wavelength peaks is gradually getting bigger with wavelength increase is finally revealed.

**Keywords** Long period gratings (LPGs); Cladding mode; Effective refractive index; Coupling coefficient; Resonant wavelength



**Cui Chunlei** was born in 1978, in Henan Province, China. He received the B. S. degree in physics from Beijing Institute of Technology, in 2001. He is currently pursuing the M. S. degree in Institute of Information, Jinan University. His current research interest is in the field of fiber communication and fiber gratings.