

# 长周期光纤光栅导模与包层模的耦合分析

孔 梅 周 文 汤伟中

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘 要** 在对包层模进行远离截止近似下, 利用耦合模理论分析了长周期光纤光栅中导模与包层模的耦合, 并与短周期光纤光栅进行了比较, 指出长周期光纤光栅的工作特性可由它的相位匹配条件来说明. 计算结果与实验现象相符.

**关键词** 长周期光纤光栅, 包层模, 模式耦合.

光纤光栅在光纤传感和光纤通信领域发挥着越来越重要的作用. 迄今为止对光纤光栅的研究主要集中在短周期光纤光栅, 它将光功率从光纤中前向传输的导模耦合到反向传输的导模或辐射模, 具有很好的选频作用, 在滤波、光纤色散补偿及波分复用等方面有重要应用. 而长周期光纤光栅近来也引起了人们的重视, 它可实现前向传输的导模与其它前向导模或前向辐射模之间的耦合, 具有无后向反射的特点, 特别适合于光纤放大器和激光器输出的光谱整形, 可避免由后向反射带来的杂散激发. 另外, 长周期光纤光栅的耦合波长对温度等外界因素较敏感, 可制作多种光纤传感器. 它还具有加工简单、成本低、对加工精度要求不高等优点, 具有很好的应用前景. 最近, Vengsarkar 等<sup>[1]</sup>对长周期光纤光栅进行了实验分析, 并将其用于掺铒光纤放大器的增益均衡<sup>[2]</sup>及光纤传感<sup>[3]</sup>等方面, 取得了较好的结果.

长周期光纤光栅与短周期光纤光栅的工作机理是相同的, 即当光纤中的两个模式之间满足由光栅周期决定的相位匹配条件时, 它们之间能够实现能量交换, 即发生耦合. 但耦合到辐射模的长周期光纤光栅, 与短周期光纤光栅相比表现出不同的工作特性. 理论分析这些工作特性, 对长周期光纤光栅的实验分析和设计加工都具有重要的指导意义. 本文在对光纤中的包层模进行远离截止近似的前提下, 用耦合模理论计算了单模光纤中导模与包层模耦合的耦合波长与光栅周期的关系、耦合系数和功率转换谱, 指出了长周期光纤光栅工作特性与其相位匹配条件之间的联系. 数值计算结果显示的光栅特性与文献[1]中的实验现象相符合.

## 1 光纤中的包层模

文中带下角标 1、2 的参数分别为与导模和包层模相关的量. 对光纤中的模式进行分析时, 通常都视包层为无限厚, 这种近似的结果是, 辐射模的传播常数是连续的, 其能量向径向无穷远辐射开去. 然而实际的包层是有限厚的, 其折射率远高于周围空气的折射率, 因而

必存在受其限制的分立的模式. 这些模式的能量由于包层-空气界面的不完善和光纤弯曲而很快衰减, 这种由包层限制的分立的辐射模, 可称为包层模<sup>[1]</sup>. 长周期光纤光栅中导模与辐射模的耦合一般是指与这种包层模的耦合.

在分析包层模时, 忽略纤芯与包层间的折射率差, 将纤芯与包层整体视为空气中的裸光纤. 由于包层与空气折射率差很大, 包层直径也很大, 这样的一段裸光纤中可存在数量极大的模式, 而众多的低阶模都是远离截止的. 以包层半径  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ 、折射率  $n_2 = 1.448$ 、波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  为例, 归一化频率为  $V_2 = 265$ , 可传输约  $3.5 \times 10^4$  个模式. 与阶梯光纤中导模的分析相同, 可得包层模的模场分布及本征值方程. 对于远离截止的模式, 其绝大部分能量束缚在纤芯和包层中, 耦合系数只与参与耦合的两个模式的电场有关, 故只考虑模式电场位于光纤内的部分. 设光波电场为  $E_2(r, \phi) \exp [i(\beta_2 z - \omega t)]$ ,  $\beta_2$  为包层模的传播常数, 按 Snitzer<sup>[4]</sup> 的分析, 在远离截止近似下, 模式的本征值方程为

$$J_{\nu \pm 1}(U_2) = 0, \tag{1}$$

电场分布为

$$\begin{aligned} E_{2z} &= A J_\nu(U_2 r/a_2) \exp(i\nu\phi) \\ E_{2r} &= \mp iA(\beta_2 a_2/U_2) J_{\nu \pm 1}(U_2 r/a_2) \exp(i\nu\phi), \quad (\nu \geq 1, r \leq a_2) \\ E_{2\phi} &= -A(\beta_2 a_2/U_2) J_{\nu \pm 1}(U_2 r/a_2) \exp(i\nu\phi) \end{aligned} \tag{2}$$

其中  $U_2^2 = a_2^2(k_0^2 n_2^2 - \beta_2^2)$ ,  $k_0$  为真空中的波数,  $A$  是常系数,  $J_\nu(x)$  为  $\nu$  阶第一类贝塞尔函数, 负正号分别对应 EH 模和 HE 模.  $\nu = 0$  时的本征值方程为  $J_1(U_2) = 0$ , TE、TM 模的电场分布分别为

$$E_{2z} = E_{2r} = 0, \quad E_{2\phi} = B J_0'(U_2 r/a_2); \tag{4a}$$

和  $E_{2z} = C J_0(U_2 r/a_2), \quad E_{2r} = iC(\beta_2 a_2/U_2) J_0'(U_2 r/a_2), \quad E_{2\phi} = 0. \tag{4b}$

$r \leq a_2$ ,  $B$ 、 $C$  为常系数, 撇号表示对贝塞尔函数的宗量求导. 可见, 由包层构成的裸光纤, 尽管不满足弱导条件, 但对于远离截止的模式, 其模场分布形式仍与弱导光纤中的导模一致<sup>[5]</sup>. 当  $U_2/a_2$  值很小时,  $\beta_2 a_2/U_2 \gg 1$ , 光波场的轴向分量远小于横向分量, 光波场几乎是横向的, 这也与弱导时的情况相同.

## 2 长周期光纤光栅导模与包层模的耦合

图 1 为光纤光栅中的相位匹配示意图. 按以上分析, 光纤中的模式可分为束缚在纤芯中的导模, 束缚在包层以内的包层模和此外的真正的辐射模.  $\Lambda_L$  和  $\Lambda_S$  分别为长、短周期光纤光

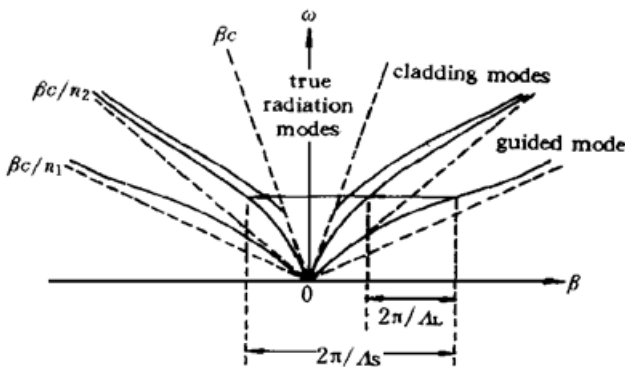


Fig. 1 Intermodal phase matching by fiber gratings.  $c$  is light speed in vacuum

栅的周期. 按照相位匹配条件, 当光栅周期很小时, 前向传输的导模能与后向导模或包层模耦合, 当光栅周期很大时, 则可与前向的其它导模或前向包层模耦合.

模式间的耦合除要求满足相位匹配条件外, 两个模式的电场偏振还要有充分的重叠, 以取得较大的耦合系数. 弱导单模光纤中的  $HE_{11}$  模非常接近于横场, 即  $E_{1r}, E_{1\phi} \gg E_{1z}$ , 而且导模场完全被束缚在芯区及靠近芯区的包层中, 如图 2(a) 所

示. 所以有效的耦合只能发生在导模与横向场分量中心最强的包层模之间, 从(2)式和(4)式可见, 这样的包层模只能是  $HE_{1p}$  模,  $p$  为径向阶数. 图 2(b) 示出了  $HE_{11}$  和  $HE_{13}$  包层模电场横向分量沿径向的分布. 图 2 计算中所用数据为纤芯半径  $a_1 = 2 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.46$ , 包层半径和折射率同前, 光波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $A = 1$ , 导模传播常数  $\beta_1$  的计算采用了近似公式<sup>[6]</sup>

$$\beta_1^2 = k_0^2 n_1^2 + (1.1428V_1 - 0.9960)^2 / a_1^2. \quad (5)$$

图中略去了  $E_r$  和  $E_\phi$  间的相位差别.

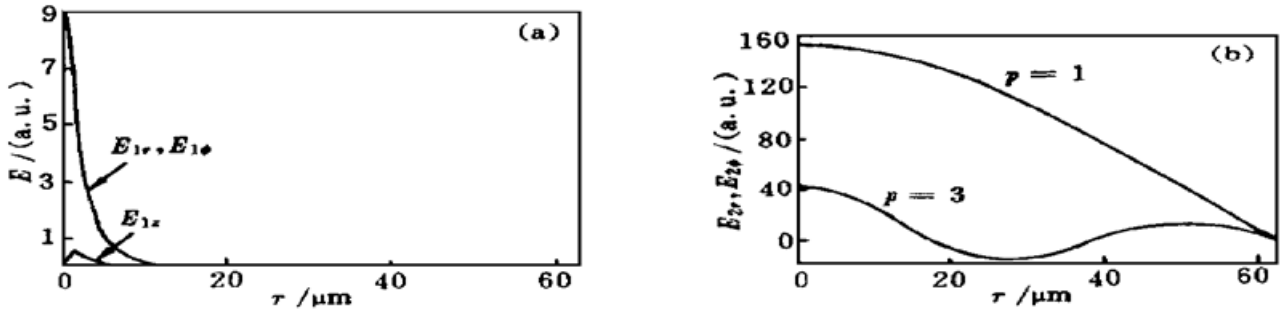


Fig. 2 (a) Radial distribution for electric field of  $HE_{11}$  guided mode, (b) Radial distribution for transverse electric field of  $HE_{11}$  and  $HE_{13}$  cladding modes

## 2.1 耦合波长

长周期光纤光栅导模与包层模耦合的相位匹配条件为

$$\beta_1 - \beta_2^{(p)} = 2\pi/\Lambda_L \quad (6)$$

$\beta_2^{(p)}$  为  $HE_{1p}$  包层模的传播常数. 利用(3)式和(5)式计算了  $HE_{11}$  导模与前 10 个  $HE_{1p}$  包层模耦合的中心波长与光栅周期的关系, 如图 3 所示, 设光栅带来的纤芯折射率的平均增加为  $\Delta n_{av} = 1.0 \times 10^{-4}$ , 其它参数的选取同前. 虚线为当  $\Delta n_{av} = 5.0 \times 10^{-4}$  时耦合到  $HE_{13}$  和  $HE_{18}$  包层模的波长-周期关系.

与短周期光纤光栅导模与包层模的耦合<sup>[7]</sup>比较, 可以看到, 长周期光纤光栅耦合到不同包层模的波长间隔很大, 如当  $\Lambda_L = 400 \mu\text{m}$  时, 耦合到  $HE_{11}$  和  $HE_{12}$  包层模的中心波长相差约 15 nm. 而短周期时耦合到相邻模式的波长间隔不到 1 nm. 产生这种差别的原因可作如下分析. 设在某一波长下, 长、短周期光纤光栅都耦合到  $HE_{11}$  包层模, 相位匹配公式分别为  $\beta_1 - \beta_2^{(1)} = 2\pi/\Lambda_L$  和  $\beta_1 + \beta_2^{(1)} = 2\pi/\Lambda_s$ . 由于  $\beta_2^{(2)} < \beta_2^{(1)}$  (见图 1), 则有  $\beta_1 - \beta_2^{(2)} > 2\pi/\Lambda_L$  和  $\beta_1 + \beta_2^{(2)} < 2\pi/\Lambda_s$ . 若要耦合到  $HE_{12}$  包层模, 在短周期光纤光栅时应减小波长, 此时  $\beta_1$  和  $\beta_2^{(2)}$  同时增大, 它们的和增长很快, 所以波长只需稍有减小, 就能实现和第二个包层模的耦合; 而在长周期时应使波长加大,  $\beta_1$  和  $\beta_2^{(2)}$  同时减小, 只是  $\beta_1$  比  $\beta_2^{(2)}$  减小得更快些, 它们的差减小缓慢, 要经过很大的波长变化后才达到  $\beta_1 - \beta_2^{(2)} = 2\pi/\Lambda_L$ , 即实现与第二个包层模间的相位匹配.

与短周期光纤光栅时的另一点不同是, 长周期光纤光栅的耦合中心波长随光栅调制深度的增加而大幅度漂移. 在短周期时的波长漂移则很小(一般小于 1 nm). 产生这种差别的原因也是由于长、短周期光纤光栅的相位匹配公式中传播常数间的符号差别. 随着调制深度增

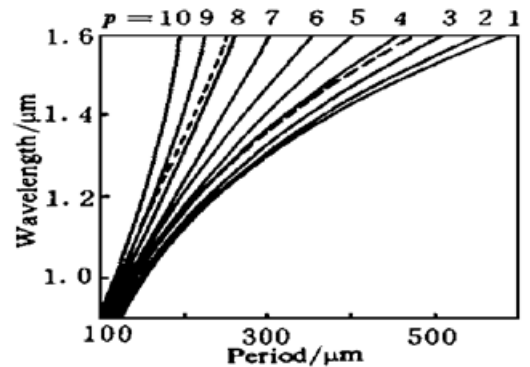


Fig. 3 Relationship between wavelengths and grating periods for guided-to-cladding mode coupling

加, 纤芯的平均折射率加大, 使得  $\beta_1$  加大, 相位匹配条件在原波长处不再满足, 而将在较大波长处得以满足. 由于当波长变化时  $\beta_1$  和  $\beta_2^{(p)}$  的同向变化, 在短周期时波长稍有增加即可实现新的相位匹配, 在长周期时则需要波长增加很大.

2.2 耦合系数和功率转换谱

由耦合模理论, 电场分别为  $E_1$  和  $E_2$  的两个模式间发生耦合的耦合系数为<sup>[8]</sup>

$$\kappa = (k_0/2 \sqrt{n_1 n_2}) (\int_{\sigma_\infty} \delta n_1^2 E_1 E_2^* d\sigma) / (\int_{\sigma_\infty} E_1 E_1^* d\sigma \int_{\sigma_\infty} E_2 E_2^* d\sigma)^{1/2} \quad (7)$$

其中  $\sigma$  为垂直于光纤轴的截面,  $\delta n_1^2$  为光栅带来的纤芯相对介电常数的微扰的一阶傅里叶分量.

设光栅形状为余弦形,  $\delta n_1^2 \approx 2n_1 \Delta n_1$ ,  $\Delta n_1$  为光栅折射率变化的振幅. 对于非归一的电场, (7) 式中引入了归一化因子  $[\frac{n}{2} (\frac{\epsilon_0}{\mu_0})^{1/2} \int_{\sigma_\infty} E E^* d\sigma]^{1/2}$  (其中  $\epsilon_0$ 、 $\mu_0$  分别为真空中的介电常数和磁导率). 代入导模和包层模的电场, 取积分范围为整个光纤截面, 可得到在  $1.55 \mu\text{m}$  波长处耦合到各个包层模的耦合系数, 如图 4 所示, 其中取  $\Delta n_1 = 5.0 \times 10^{-4}$ . 由于径向阶数  $p$  高的包层模与导模电场横向分量间的重叠性更好(见图 2), 所以导模耦合到这些包层模的耦合系数更大; 但随  $p$  增大,  $\beta_2 a_2 / U_2$

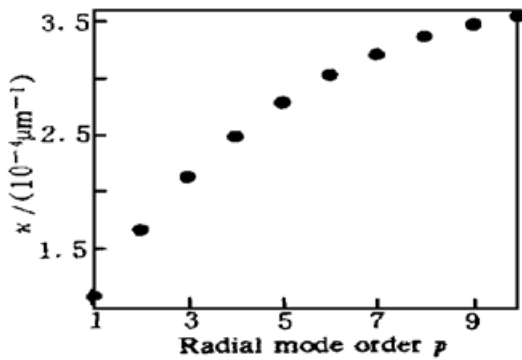


Fig. 4 Coupling constants for guided-to-cladding mode coupling

值减小, 包层模电场横向性减弱, 耦合系数的增长速度下降. 导模耦合到包层模的功率转换为<sup>[8]</sup>

$$\frac{P_2(l)}{P_1(0)} = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (\Delta\beta/2)^2} \sin^2[\sqrt{\kappa^2 + (\Delta\beta/2)^2} l] \quad (8)$$

其中  $\Delta\beta/2 = (\beta_1 - \beta_2^{(p)} - 2\pi/\Lambda_L)/2$  是解调因子,  $l$  为光栅长度. 图 5 示出了导模至几个包层模的功率转换谱. 为了便于比较, 各曲线对应于不同的光栅长度, 使其在中心波长处的耦合效率都是 1, 即使  $\kappa l = \pi/2$ . 从图中可看出, 长周期光纤光栅的耦合谱带宽较大, 这也与它的相位匹配条件有关. 实际上, 解调因子即表示相位不匹配的程度, 相位匹配公式中传播常数间的异号, 导致解调因子随波长变化缓慢, 故耦合带宽较大. 另外, 由于到径向阶数高的模

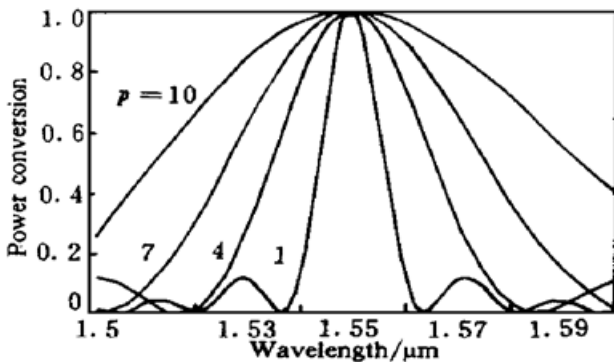


Fig. 5 Power conversion spectra for guided-to-cladding mode coupling

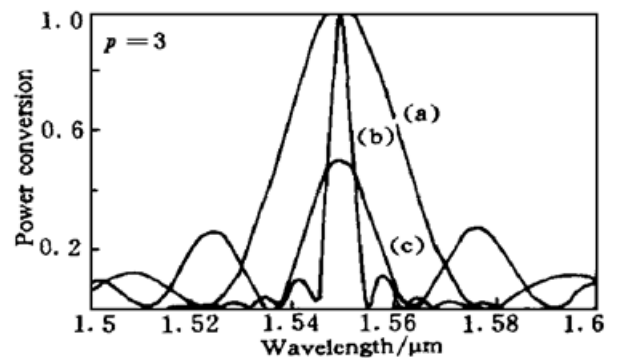


Fig. 6 Power conversion spectra for guided mode coupling to HE<sub>13</sub> cladding mode at different conditions. (a)  $\Delta n_1 = 5.0 \times 10^{-4}$ ,  $\kappa l = \pi/2$ ; (b)  $\Delta n_1 = 1.0 \times 10^{-4}$ ,  $\kappa l = \pi/2$ ; (c)  $\Delta n_1 = 5.0 \times 10^{-4}$ ,  $\kappa l = 3\pi/4$

式的耦合系数大, 在不发生过耦合时, 达到同样转换效率所需的光栅长度较小, 因而带宽更大.

图 6 为在不同调制深度和光栅长度下耦合到  $HE_{13}$  包层模的功率转换谱. 从中可以看出, 当  $\kappa l > \pi/2$  时, 将发生过耦合, 光功率在导模和包层模之间发生往返传递, 这是反向耦合的短周期光纤光栅中所没有的现象. 模式间的同向耦合使得长周期光纤光栅耦合谱可调谐度大. 总的来讲, 增加光栅调制深度, 即加大  $\Delta n_1$  时, 带宽加大, 增大光栅长度时带宽变小.

上述计算显示的光栅特性与文献[1]中的实验现象符合得很好.

**结 论** 本文在对包层模进行远离截止近似下, 利用耦合模理论分析了长周期光纤光栅中导模与包层模的耦合情况. 计算结果表明, 长周期光纤光栅的工作特性明显不同于短周期光纤光栅, 表现为耦合到不同包层模的波长间距大, 耦合中心波长随调制深度变化而大幅度漂移, 耦合带宽较大. 分析表明, 长周期光纤光栅的这些工作特性主要与它的不同于短周期时的相位匹配公式有关. 它的这些特点使其具有独特的应用价值, 如可利用几个长周期光纤光栅的组合, 实现掺铒光纤放大器的增益平坦等.

### 参 考 文 献

- [1] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1) : 58~ 65
- [2] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber-grating-based gain equalizers. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(5) : 336~ 338
- [3] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9) : 692 ~ 694
- [4] Snitzer E. Cylindrical dielectric waveguide modes. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961, **51**(5) : 491~ 498
- [5] Admas M J. *An Introduction to Optical Waveguides*. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1981. 228
- [6] Jeunhomme L B. *Single-Mode Fiber Optics*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1983. 14
- [7] Mizrahi V, Sipe J E. Optical properties of photosensitive fiber phase gratings. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(10) : 1513~ 1517
- [8] 亚里夫 A, 叶 P. 晶体中的光波. 北京: 科学出版社, 1991. 156

## Analysis of Guided-to-Cladding Mode Coupling by Long-Period Fiber Gratings

Kong Mei    Zhou Wen    Tang Weizhong

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 3 September 1997; revised 17 March 1998)

**Abstract** Considering the cladding modes as far from cut off, the intermodal coupling between guided and cladding modes by long-period fiber gratings is analysed using coupled modes theory, and compared with that of short-period fiber gratings. It is pointed out that the properties of long period fiber grating are related to its phase matching condition. Computation results show good consistent with experiments.

**Key words** long-period fiber grating, cladding mode, intermodal coupling.