

·光电器件与材料·

## 环境折射率对长周期光纤光栅谐振波长的影响

黄 富, 曾庆科, 秦子雄, 周恒超, 谢军华, 黄尚荣

(广西师范大学物理与电子工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**长周期光纤光栅是近几年出现的新型光纤器件, 表现为前向传播的纤芯导模与同向传播的各阶次包层模在特定波长时的模式耦合, 因此它在温度、应变、折射率传感方面比普通的光纤光栅有更大的优越性. 运用耦合模理论, 首先讨论了长周期光纤光栅的谐振波长, 并模拟了其透射谱. 其次在理论上详细分析了长周期光纤光栅对环境折射率的敏感特性, 讨论了环境折射率敏感度因子与包层模次数的关系, 并比较了不同环境折射率下的灵敏度. 最后模拟了在环境折射率小于光栅包层折射率的情况下, 谐振波长随环境折射率变化的规律.

**关键词:**长周期光纤光栅; 环境折射率; 谐振波长

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2009)03-0040-04

## Affects of the Surrounding Refractive Index to Resonant Wavelength of the Long-Period Gratings

HUANG Fu, ZENG Qing-ke, QIN Zi-xiong, ZHOU Heng-chao, XIE Jun-hua, HUANG Shang-rong

(College of Physics and Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Long-period fiber grating is a new kind of fiber device developed in recent years, which couples light from the forward-propagating guided core mode into co-propagating cladding modes at special wavelengths, with more advantages over normal fiber gratings at the aspects of temperature, strain, refractive index sensing. Based on coupled mode theory, the resonant wavelength of LPFG was discussed and its transmission spectrum was simulated. The sensitivity of the long-period gratings to the surrounding refractive index was analyzed theoretically, and the relationship between the surrounding refractive index factors and the cladding mode orders was discussed while the sensitivities at different surrounding refractive index were compared. The changing rule of the resonant wavelength versus the surrounding refractive index was simulated, under the condition of the surrounding refractive index less than the cladding refractive index.

**Key words:** long-period fiber grating; surrounding refractive index; resonant wavelength

自从 1995 年 A. M. Vengsarkar 等人<sup>[1]</sup>在光敏光纤中成功的写入长周期光纤光栅以来, 长周期光纤光栅在光通信和光传感领域受到了越来越多的重视, 并成为近十多年来的一个研究热点. 长周期光纤光栅具有易于制造、插入损耗低、无后向反射、易于集成等优点, 因此在光通信系统中可作为带阻滤波器、掺铒光纤放大器(EDFA)的增益平坦元件、梳状滤波器、模式转换器等; 另一方面由于长周期光纤光

栅的耦合特性容易受外界环境因素的影响, 对外界的温度、应力、弯曲、折射率等物理参量非常的敏感, 因此可作为温度、应力、折射率传感器或生物化学传感器. 光纤光栅的光传感, 主要是以其透射谱中的损耗峰中心波长随外界参量的变化而移动为基础的. 外界条件包括外部环境温度、外部环境的折射率、光纤弯曲、对光纤施加应力等, 这些条件的改变可能引起光栅周期的变化或者是改变了纤芯和包层模的有

收稿日期: 2009-03-25

作者简介: 黄富(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光纤通信器件及传感器.

效折射率差.这些变化将导致纤芯导模和包层模之间的相位匹配条件发生改变,最终表现为光栅损耗峰的中心波长的变化.就环境折射率对长周期光纤光栅谐振波长的影响进行了详细的讨论,这对于设计基于长周期光纤光栅的液位、浓度传感器具有一定的指导意义.

## 1 理论分析

长周期光纤光栅(LPFG)的周期一般为  $100 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ ,在这个范围内,根据耦合模理论,它的模式耦合发生在纤芯导模与同向传输的一阶各次包层模之间,耦合到包层区的光波迅速衰减掉,结果在光纤的透射谱的不同波长处出现了一系列损耗峰,每一个损耗峰对应着纤芯导模与不同阶次的包层模的耦合,如图1所示.文中所有图所用的参数:  $n_1 = 1.4681$ ,  $n_2 = 1.4628$ ,  $r_{co} = 4.15 \mu\text{m}$ ,  $r_{cl} = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $n_3 = 1$

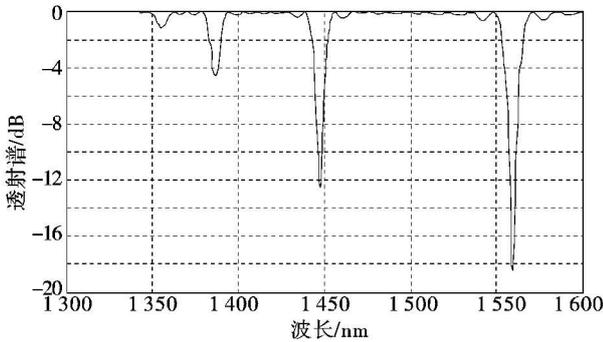


图1 长周期光纤光栅透射谱

### 1.1 长周期光纤光栅的谐振波长

LPFG的第  $j$  阶包层模式对应的谐振波长  $\lambda_j$ ,由纤芯导模和包层模之间的相位匹配条件<sup>[2]</sup>给出:

$$\lambda_j = (n_{eff}^{co} - n_{eff,j}^{cl})\Delta \quad (1)$$

其中,  $n_{eff}^{co}$  为纤芯导模的有效折射率;  $n_{eff,j}^{cl}$  为第  $j$  阶包层模的有效折射率;  $\Delta$  为光纤光栅的周期.

$n_{eff}^{co}$  和  $n_{eff,j}^{cl}$  可通过分别求解纤芯导模和包层模的色散方程得到, Turan Erdogan 对这 2 个方程已进行了详尽的分析<sup>[3]</sup>, 在此不再赘述. 一般来说, 光纤包层的直径比芯层的直径大得多, 包层直径的大小对芯层有效折射率 ( $n_{eff}^{co}$ ) 几乎没有什么影响, 所以当光纤包层直径变小时, 可以认为芯层的有效折射

率基本不变. 另一方面, 对于包层模的有效折射率  $n_{eff,j}^{cl}$ , 除了与光纤芯层和包层的折射率、芯层的直径有关外, 还与包层直径以及外界折射率有关, 这是因为包层模式的光场不仅分布在纤芯和包层中, 还分布在包层以外的环境介质中, 所以外界折射率的变化将会影响包层模的有效折射率, 从而引起谐振波长的移动.

### 1.2 长周期光纤光栅对环境折射率的敏感性

LPFG 谐振波长  $\lambda_{res}$  对环境折射率的灵敏度<sup>[4]</sup> 可以表示为

$$\frac{d\lambda_{res}}{dn_3} = \lambda_{res} \cdot \gamma \cdot \Gamma \quad (2)$$

其中,  $\gamma$  为描述波导色散的一个系数;  $\Gamma$  表示与环境折射率的关系, 有

$$\gamma = \frac{\frac{d\lambda_{res}}{d\Delta}}{n_{eff}^{co} - n_{eff,j}^{cl}} \quad (3)$$

$$\Gamma = - \frac{u_m^2 \lambda_{res}^3 n_3}{8\pi^3 r_{cl}^2 n_{cl} (n_{eff}^{co} - n_{eff,j}^{cl}) (n_2^2 - n_3^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

式(4)中,  $u_m$  是第一类零阶贝塞尔函数的第  $m$  个根.

为了保证包层模的存在, 考虑环境折射率低于包层折射率的情况 ( $n_3 < n_2$ ). 由式(4)可知,  $\Gamma$  为负值,  $\gamma$  系数中的  $\frac{d\lambda_{res}}{d\Delta}$  决定了  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  的正负. 将式(1)的两边分别对波长求微分得

$$\frac{d\Delta}{d\lambda_{res}} = \frac{\delta n_{eff} - \lambda \left[ \frac{d\delta n_{eff}}{d\lambda_{res}} \right]}{(\delta n_{eff})^2} \quad (5)$$

分别定义纤芯导模和包层模的群折射率<sup>[5]</sup>

$$n_{cog} = n_{eff}^{co} - \lambda_{res} \frac{dn_{eff}^{co}}{d\lambda_{res}} \quad (6)$$

$$n_{clg} = n_{eff}^{cl} - \lambda_{res} \frac{dn_{eff}^{cl}}{d\lambda_{res}} \quad (7)$$

把式(6)、式(7)代入式(5)就可以得到耦合波长与光栅周期的斜率关系

$$\frac{d\Delta}{d\lambda_{res}} = \frac{\delta n_g}{(\delta n_{eff})^2} \quad (8)$$

其中,  $\delta n_g = n_{cog} - n_{clg}$ ;  $\delta n_{eff} = n_{eff}^{co} - n_{eff,j}^{cl}$ . 由式(8)可知,  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  的正负与  $\delta n_g$  的一致. 图2是对纤芯导模群折射率与包层模群折射率的比较. 当  $n_{cog} > n_{clg}$  时,  $\delta n_g$  为正; 当  $n_{cog} < n_{clg}$  时,  $\delta n_g$  为负. 波导色散因

子与包层模阶数的关系如图 3 所示.

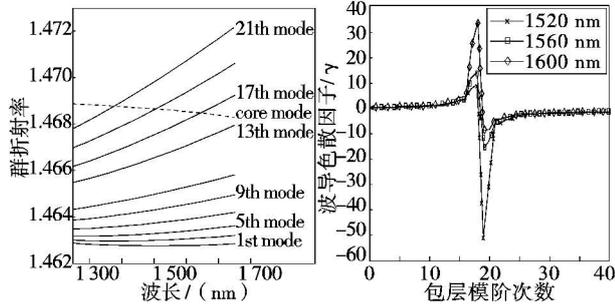


图 2 纤芯导模群折射率与包层模群折射率的比较  
图 3 不同谐振波长的波导色散因子与包层模阶次数的关系

由波导色散因子的定义式可知,  $\gamma$  的符号与  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  一致, 可以为正也可以为负. 图 3 也说明了这一点. 当包层模的阶数较小时,  $\gamma$  为正, 而对于较大的包层模阶数,  $\gamma$  为负. 例如波长等于 1 520 nm, 当模阶数  $\nu = 18$  时,  $\gamma$  由正变为负. 模拟中虽然只是选择了 1 520、1 560、1 600 nm 等不同的谐振波长, 但是对于其他的不同谐振波长, 其  $\gamma$  与  $\nu$  的关系曲线的大概趋势是一致的,  $\gamma$  符号的转变存在一个“转折点”, 且此转折点出现的模式次数相同. 在转折点附近,  $\gamma$  值相差较大, 而离转折点较远处的  $\gamma$  值几乎相同. 因此, 如果选择在“转折点”附近的包层模阶数, 可以得到最大的灵敏度. 对于不同的光纤参数, 由于波导色散特性不同, 其“转折点”出现的位置所对应的包层模的阶数是不同的. 研究表明, 纤芯与包层的有效折射率差越大, “转折点”出现时所对应的模式次数越大, 也就是曲线向右移.

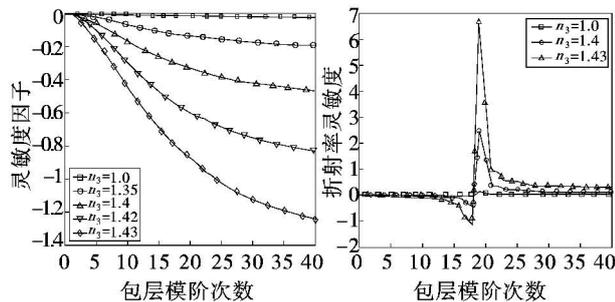


图 4 环境折射率敏感度因子 ( $\Gamma$ ) 与模次数的关系图  
图 5 环境折射率灵敏度 ( $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$ ) 与模次数的关系

图 4 表示 5 个不同折射率的环境折射率敏感度因子 ( $\Gamma$ ) 与模次数的关系图, 所选的谐振波长是  $\lambda_{res} = 1 520$  nm. 从图 4 中可以看出,  $\Gamma$  总是负的 ( $n_3 < n_2$ ). 对于一个给定的  $n_3$ ,  $\Gamma$  的数值总是随着模次数的增加而迅速增大, 在  $\nu \geq 40$  时曲线趋于平缓,

即接近了饱和. 同时  $\Gamma$  值也随  $n_3$  的增大而迅速增大. 图 5 表示环境折射率灵敏度  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  与模次数的关系, 谐振波长也是  $\lambda_{res} = 1 520$  nm. 从图 5 中可以清楚地看出  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  的特性, 因为  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  仅仅是由波导色散因子  $\gamma$  决定的. 对于低阶模,  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  是负的, 而对于高阶模  $\frac{d\lambda_{res}}{dn_3}$  是正的. 因此, 对于更高阶次的包层模, 其敏感性也越大, 这与  $\Gamma$  的特性一致.

### 1.3 环境折射率对谐振波长的影响

由以上的讨论分析可知, 长周期光纤光栅对环境折射率传感的灵敏度与所耦合的包层模阶数有密切的关系, 由环境折射率变化引起的谐振波长移动量可正可负, 具体由  $\gamma$  的符号来决定. 后面所讨论的是包层模阶数在  $\gamma > 0$  的情况下.

为了更好地说明环境折射率的变化对长周期光纤光栅透射谱的影响, 模拟了当环境折射率由 1.0 逐渐变化到 1.458 时, 康宁 SMF-28 光纤的纤芯导模与一阶 7 次包层模式耦合的谐振波长的变化, 如图 6 所示. 由图 6 可见, 随着  $n_3$  的逐渐增加, 长周期光纤光栅的谐振波长逐渐向短波方向漂移 (此结论成立的条件是环境折射率变化的最大值小于包层折射率). 为了分析由于环境折射率的变化而导致的谐振波长移动以及对外界折射率的灵敏度的影响, K. S. Chiang 等人<sup>[6]</sup>提出的分析方法能给出近似的解析表达式, 而且比较直观. 因为光纤的纤芯层相对包层来说很小, 所以在这种分析方法中, 他将纤芯的存在近似为没有纤芯的理论值与纤芯微扰之和, 以此来计算包层模的有效折射率. 当环境折射率从  $n_3$  变到  $n'_3$  时, 其谐振波长的移动量为<sup>[6]</sup>

$$\delta\lambda_{res} \approx \frac{u_m^2 \lambda_{res}^3 \Lambda}{8\pi^3 n_2 r_{cl}^3} \left[ \frac{1}{(n_2^2 - n_3^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(n_2^2 - n_3'^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 对于相同包层半径的长周期光纤光栅, 高阶包层模的谐振波长移动量比低阶包层模的要大, 也就是高阶包层模对环境折射率的灵敏度比低阶包层模的要高. 图 7 根据式(9)模拟了  $LP_{07}$ 、 $LP_{09}$  两个包层模的波长偏移量与环境折射率变化之间的关系. 从图 7 中可以看出当折射率从 1.00 变化到 1.46 时,  $LP_{07}$  的谐振波长偏移量大约是 15 nm, 而  $LP_{09}$  的谐振波长大概有 40 nm 的偏移, 所以包层模阶次数高的谐振波长偏移量比低阶次的要

大.另外,当  $n_3$  在 1.0~1.1 范围内时,谐振波长的偏移比较缓慢,敏感度不高.而  $n_3$  在 1.1~1.458 的范围内谐振波长的偏移则比较显著,所以用此类长周期光纤光栅测量环境折射率位于 1.1~1.458 范围内的未知物质的折射率以确定其化学构成或组成元素的变化是可能的.

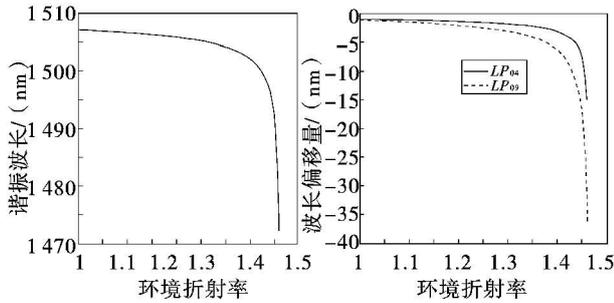


图 6 谐振波长与外界折射率的关系 图 7 环境折射率与谐振波长偏移量的关系

## 2 结 束 语

从理论上分析了环境折射率对长周期光纤光栅谐振波长的影响,详细模拟计算了不同谐振波长的波导色散因子与包层模阶次数的关系,这是因为波导色散因子  $r$  符号存在一个由正到负的“转折点”,

选择“转折点”附近的包层模,会得到较高的灵敏度.最后模拟了在环境折射率小于光栅包层折射率的情况下,长周期光纤光栅谐振波长随环境折射率变化的规律,这对于长周期光纤光栅的封装以及在传感中的应用具有指导意义.

## 参考文献

- [1] A M Vengsarkar, P J Lemair, J B Judkins, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. J. Lightwave Technol., 1996, 14(1): 58-65.
- [2] T Erdogan. Fiber grating spectra[J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1277-1294.
- [3] T Erdogan. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [4] X Shu, L Zhang, I Benion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. J. Lightwave Technol., 2002, 20(2): 255-266.
- [5] A Cherin. An Introduction to optical fibers[M]. McGraw-Hill, Singapore, 1989.
- [6] K S Chiang, Y Liu, M N Ng, et al. Analysis of etched long-period fiber grating and its response to external refractive index[J]. Electron. Lett., 2000, 36(17): 966-967.

(上接第 16 页)

之间,而目标的光谱范围集中在  $0.6\sim 0.85\ \mu\text{m}$ ,通过光谱滤波后,可使目标和天空背景的对比度明显提高.探测器光谱响应曲线如图 2 所示,其峰值响应曲线在  $0.5\sim 0.55\ \mu\text{m}$ .  $0.6\sim 0.8\ \mu\text{m}$  是空间目标相对于天空背景最强的波段,因此光谱滤波应选择在  $0.6\ \mu\text{m}$  以上. CCD 本身也是一个光谱滤波器,其对不同频段的光谱具有不同的量子效率<sup>[5]</sup>. 因此选择光谱滤波时要考虑 CCD 的光谱响应特性.采用  $0.6\ \mu\text{m}$  前截止光谱滤波试验证明可显著提高目标背景的对比度.

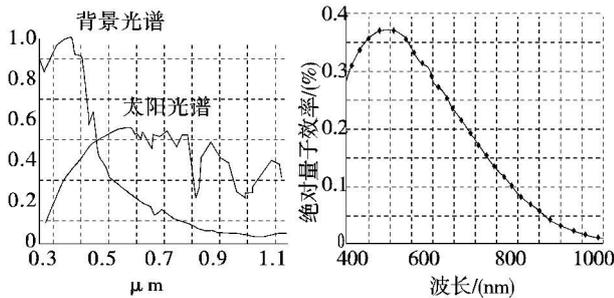


图 1 太阳光谱和背景光光谱曲线图 图 2 探测器光谱响应曲线

降低目标成像的弥散系数同样提高了目标光强度,增加对比度.提高电视处理系统的弱信号处理能力,采取相关和背景抵消技术,降低信号提取的信噪比也可增加电视系统作用距离.因此,可采用光学和信号处理手段相结合的方法提高电视系统的作用距离.

## 参考文献

- [1] 吕超全,蓝邦固.提高电视跟踪系统作用距离的方法探讨[J].光电工程,1992,19(6):38-48.
- [2] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 王家骥.光学仪器总体设计[R].长春:中科院长春光学精密机械研究所,1998.
- [4] 朱著祥,谢谦.利用光谱滤波技术提高 CCD 对天空微弱目标的探测能力[J].飞行器测控技术,1989,12(1).
- [5] 江月松.光电技术与实验[M].北京:北京理工大学出版社,2000.