

长周期光纤光栅(LPFGs)的谱结构研究

张自嘉^{1,3} 施文康¹ 高 侃² 方祖捷²

(1 上海交通大学信息检测技术及仪器系, 上海 200030)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

(3 郑州航空工业管理学院, 郑州 450052)

摘 要 利用相位匹配条件, 从理论和实验上研究了均匀 LPFGs 的谱结构特点. 结果表明, 导模和不同包层模耦合产生的光谱特性有很大差别. 在模序较小时, 谱宽较小; 模序增加, 谱宽也增加; 在某一模序附近, 谱宽达到最大; 以后随模序增加, 谱宽迅速减小. 给出了 LPFGs 中透射谱的最大损耗率及 3 dB 带宽与包层模序、光栅周期、耦合系数和栅长的关系. 这些关系对设计满足特定最大损耗率和带宽的带阻滤波器或增益均衡器提供一种理论参考. 选用不同的包层模、耦合系数和栅长, 可以设计出谱宽很大或很小的 LPFGs.

关键词 纤维光学; 长周期光纤光栅(LPFG); 滤波器; 增益均衡器; 光谱带宽

中图分类号 TN929.11; TN25 **文献标识码** A

0 引言

长周期光纤光栅(LPFGs)能够将沿光纤纤芯传播的导模耦合到一阶包层模中去. 对一般的单模光纤, 一阶包层模较多, 通常都有一、两百个(或更多). 较多的包层模使得 LPFGs 比 Bragg 光纤光栅复杂得多, 但另一方面也给我们提供了更多的途径, 来利用 LPFGs 设计出满足不同需要的光纤光栅器件. 例如, 在光纤通讯中, 用于掺铒光纤放大器(EDFA)增益平坦和带阻滤波的 LPFGs, 要求有适当带宽的谱结构及损耗率^[1,2,13], 而在光分插复用系统中, 特别是密集波分复用系统中, 要求解复用器有很窄的谱特性. 在 LPFGs 传感器中, 较窄的谱分布, 更容易分辨波长的偏移.

光波导的模耦合理论和实验研究, 都表明了 LPFGs 的谱结构与光纤光栅的栅长和制做时的曝光量即折射率的改变量有关^[1,2], 增加栅长和减小折射率改变量(即减小耦合系数)可以使谱结构变窄, 也可以利用相移光纤光栅来改变 LPFGs 的谱结构^[4,7]. 但是已有的文献都没有考虑导模和不同包层模的耦合特点, 只是选择了符合谐振条件的光栅周期, 因此对谱结构的改变是有限的. 当要求达到同样的指标时, 就需要付出更多的代价, 如要求窄的带宽时, 会大大增加栅长或由均匀的 LPFGs 改为较复杂的非均匀光纤光栅等.

本文从理论上分析了导模和不同包层模的耦合特点, 给出了 LPFGs 的 3 dB 带宽及最大损耗率与包层模序、栅长、耦合系数等的关系, 并和实验结果进行

了比较. 在相同栅长和耦合系数的条件下, 低模序的包层模有较窄的谱结构, 中等模序的包层模有较宽的谱结构, 而高模序的包层模则有更窄的谱结构.

1 基于不同包层模的 LPFGs 的谱特性

对普通的裸光纤, 就导模来说, 由于包层半径较大, 因此可以将导模视为在两层介质光纤中传播. 当忽略纤芯与包层之间的折射率差别时, 则包层与外界环境之间也构成两层介质的光纤. 因此在研究 LPFGs 时, 不少文献都采用了弱导的两层介质模型^[1,3,8], 有些还将导模简化为线偏振模^[6]. 本文将导模和包层模分别视为在两层和三层介质光纤中传播, 采用两层和三层介质光纤的本征方程.

计算时取 Corning SMF-28 的光纤参数, 纤芯和包层半径分别为 $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$, $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$; 纤芯、包层和外界的折射率分别为 $n_1 = 1.4681$, $n_2 = 1.4628$, $n_3 = 1$.

对于谐振波长为 λ_0 的均匀 LPFGs, 考虑模的自耦合系数(self-coupling coefficients)^[11]时, 根据 LPFGs 中一般的模耦合方程^[6], 可以得到 LPFGs 所满足的相位匹配条件为

$$\Delta\beta(\lambda_0) = \beta^{\text{co}} - \beta_{1\nu}^{\text{cl}} + \sigma(k^{\text{co-co}} - k_{1\nu-1\nu}^{\text{cl-cl}}) - 2\pi/\Lambda = 0 \quad (1)$$

式中, Λ 为 LPFGs 的周期, β^{co} 为导模的传播常数, $\beta_{1\nu}^{\text{cl}}$ 为一阶包层模的传播常数, 它们分别满足导模和包层模的本征方程. σ 为折射率调制的慢变包络(调制幅度的平均值), 它和制做时的曝光量有关. $\sigma k^{\text{co-co}}$ 和 $\sigma k_{1\nu-1\nu}^{\text{cl-cl}}$ 分别为导模和包层模的自耦合系数^[6]. 模自耦合相当于在光纤中写入光栅时, 使导模和包层模的有效折射率发生了变化, 也即对原来

的有效折射率或传播常数进行了修正^[12].

式(1)和大多文献上使用的相位匹配条件

$$\beta^{co} - \beta_{1\nu}^{cl} - 2\pi/\Lambda = 0 \quad (2)$$

相比,更准确一些,也反映了制作过程中谐振波长的偏移,式(2)是忽略模的自耦合系数 σk^{co-co} 和 $\sigma k_{1\nu-1\nu}^{cl-cl}$ 时得到的. 有些文献是将式(1)中的自耦合项,用一个平均折射率改变量来表示. 当考虑模的自耦合时,谐振条件应为式(1). 实际上,式(2)并不能很好地反映 LPGs 的一些特点. 因为对某一波长的导模和包层模, β^{co} , $\beta_{1\nu}^{cl}$ 都是一定的,由式(2)得到的 Λ 也是一定的,其谐振波长也是确定的. 然而 LPGs 在写入过程中,其谐振波长总是在变化^[9,10]. 正是这一特点,要求某一中心波长的 LPGs,可以不必严格满足式(2),而可以通过制作过程进行调节.

若周期为 Λ 的 LPGs 的谐振波长为 λ_0 ,则对波长为 λ_0 的导模,失谐量 $\Delta\beta(\lambda_0) = 0$,有最小的透射率 R_0 . 随着波长 λ 的改变,失谐量 $\Delta\beta(\lambda)$ 不再为零. 设栅区为 $0-L$, z 轴为光纤的轴线方向和光的传输方向,初始条件为: $A^{co}(z=0) = A^{co}(0)$, $A_{1\nu}^{cl}(z=0) = 0$, 则从耦合方程可求出损耗率 R

$$R = 1 - \frac{A^{co}(L)^2}{A^{co}(0)^2} = \frac{k_{1\nu}^2}{k_{1\nu}^2 + (\Delta\beta/2)^2} \cdot \sin^2(\sqrt{k_{1\nu}^2 + (\Delta\beta/2)^2}L) \quad (3)$$

其中,失谐量为

$$\Delta\beta = \beta^{co} - \beta_{1\nu}^{cl} + \sigma(k^{co-co} - k_{1\nu-1\nu}^{cl-cl}) - 2\pi/\Lambda \quad (4)$$

β^{co} 和 $\beta_{1\nu}^{cl}$ 均是 λ 的函数,分别表示波长为 λ 时的导模和一阶包层模的传播常数.

$$k_{1\nu} = \sigma k_{11-11}^{co-cl} \quad (5)$$

$k_{1\nu}$ 为导模和一阶 ν 次包层模的耦合系数, k_{11-11}^{co-cl} 可以根据文献[6]计算出来.

由式(3)可见,对确定的光纤光栅,损耗率 R 仅是波长 λ 的函数,其中的 $k_{1\nu}$ 和 $\Delta\beta(\lambda)$ 均与波长 λ 有关. 利用文献[6]中的结果,计算表明, k_{11-11}^{co-cl} 在本文所研究的波段内,随 λ 的变化不大,可视为常数. 这时对谱特性起重要影响的是 $\Delta\beta(\lambda)$, $\Delta\beta(\lambda)$ 与 λ 的不同变化关系,会使谱的特性有很大差别. 当 $\Delta\beta(\lambda)$ 随 λ 变化较快时,会有较窄的透射谱,反之则谱较宽.

计算表明, $\Delta\beta(\lambda)$ 和 λ 之间具有很好的线性关系. 图1给出了谐振波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,几个包层模的 $\Delta\beta(\lambda)$ 曲线(直线),这里取 $\sigma = 1 \times 10^{-4}$. 不同包层模的 $\Delta\beta$ 随 λ 的变化有很大差别. $\Delta\beta(\lambda)$ 的斜率与 $\beta^{co} - \beta_{1\nu}^{cl} + \sigma(k^{co-co} - k_{1\nu-1\nu}^{cl-cl})$ 有关,而与 Λ 无关. Λ 只影响 $\Delta\beta(\lambda)$ 的截距,也就是影响谐振波长的位置. $\Delta\beta(\lambda)$ 的斜率为

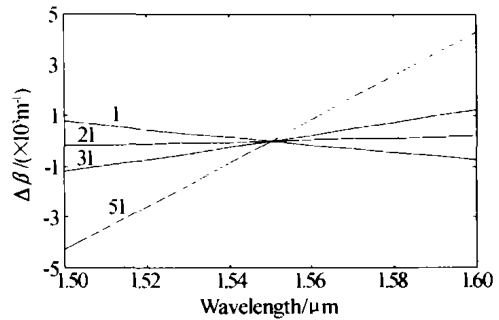


图1 $\Delta\beta(\lambda)$ 与 λ 的关系曲线 ($\sigma = 1 \times 10^{-4}$)

Fig. 1 Relationship between $\Delta\beta(\lambda)$ and λ ($\sigma = 1 \times 10^{-4}$)

$$s = \frac{d}{d\lambda} \Delta\beta(\lambda) = \frac{d}{d\lambda} (\beta^{co} - \beta_{1\nu}^{cl}) + \sigma \frac{d}{d\lambda} (k^{co-co} - k_{1\nu-1\nu}^{cl-cl}) = s_1 + s_2 \quad (6)$$

s_1 和 s_2 分别代表第一项和第二项的值,可以从导模和包层模的本征方程及耦合常数公式中求出.

计算表明,对不同的包层模, s_1 变化很大, s_2 基本不变. 图2给出了不同包层模的 s_1 , 其中 s_1 只在模序为奇数的点上才有值(即 HE 模).

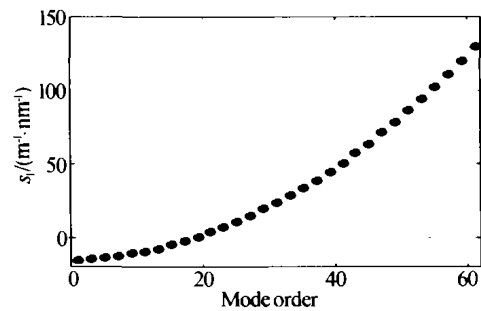


图2 不同模序的 s_1 值

Fig. 2 Values of s_1 for different mode order

由于 $k_{1\nu-1\nu}^{cl-cl}$ 比 k^{co-co} 小一个数量级,可忽略 $k_{1\nu-1\nu}^{cl-cl}$. k^{co-co} 与波长有关,但变化不是很大,图3给出了 $k^{co-co}(\lambda)$ 曲线. 可以看出,在波长 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 这样宽的范围, k^{co-co} 与 λ 也有较好的线性(其实对一个损耗峰,不必考虑这么宽的波长范围). 为方便引入 $s_2 = \sigma s_2'$, 对给定的光纤, s_2' 为常数. 对上述所给参数的光纤, $s_2' \approx -4.94 \times 10^3 (\text{m}^{-1}/\text{nm})$ (可由图3求出).

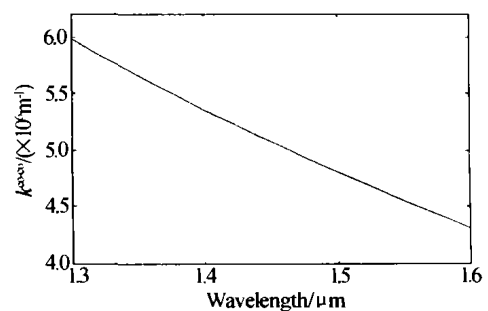


图3 k^{co-co} 与波长 λ 的关系

Fig. 3 Relationship between k^{co-co} and λ

由于 $\Delta\beta(\lambda)$ 和 λ 之间的近似线性关系,可设 $\Delta\beta = s\lambda + b$, 对某一包层模,直线的斜率 s 为常数.

图3给出了 s_1 与模序 ν (1-61) 的关系. 式(4)可改写为

$$\Delta\beta(\lambda) = (s_1 + \sigma s_2')\lambda + b_1 + b_2 - 2\pi/\Lambda \quad (7)$$

其中

$$\beta^{co} - \beta_{1\nu}^{cl} = s_1\lambda + b_1, \sigma(k^{co-co} - k_{1\nu-1\nu}^{cl-cl}) = \sigma s_2'\lambda + b_2$$

表1给出了几个包层模的 $\Delta\beta(\lambda)$ 、 $k_{1\nu-1\nu}^{co-cl}$, 将这些式子代入式(3), 可画出谱分布, 如图4所示. 可以看出谱的差别较大, 这为我们的不同应用场合, 提供了更多可供选择的余地.

表1

ν	$\Delta\beta(\lambda)/m^{-1}$	$k_{1\nu-1\nu}^{co-cl}/10^5$
1	$-14.88\lambda + 23056$	1.82
7	$-12.11\lambda + 18771$	5.54
9	$-10.72\lambda + 16616$	6.26
15	$-4.49\lambda + 6955$	7.11
51	$86.30\lambda - 133857$	2.23
79	$232.5\lambda - 360329$	1.54

表中 λ 的单位取 nm.

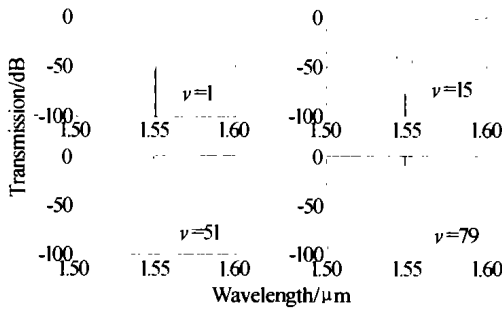


图4 利用包层模 $\nu=1, 15, 51, 79$ 的 LPFGs 的透射谱 ($\sigma = 1 \times 10^{-4}, L = L_0$)

Fig. 4 Calculated transmission spectra of LPFGs based on $\nu = 1, 15, 51, 79$ for $\sigma = 2 \times 10^{-4}, L = L_0$

通常 σ 的数量级为 10^{-4} , 对大多数包层模, s_1 远大于 (绝对值) s_2 . 从图2可以看出, $\nu = 19$ 时, s_1 最小, 变化最缓, $\nu > 19$ 后, s_1 的绝对值迅速增加.

利用一阶低次包层模的 LPFG, 随模序增加, 谱宽也增加, 这可以从一些文献 [1, 5, 9] 的实验结果上看出, 这些实验都是前几个包层模, 其斜率变化不是很大, 所以宽度变化不是十分明显. 高次包层模方面的实验报道不多, 文献 [10] 报道了一个周期为 $80 \mu\text{m}$ 的 LPFG, 利用了 $\nu = 33$ 的包层模, 其谱较窄一些.

2 LPFGs 的谱结构与相关参数的关系

用于掺铒光纤放大器的增益均衡器或带阻滤波器的 LPFGs, 要求滤波器有一定的带宽和最大损耗, 作为滤波器时, 最大损耗率应为 1, 而作为均衡器时, 要求有某一峰值损耗率 R_0 . 当 $\Delta\beta = 0$, 可以得到峰值损耗率 R_0 . 由式(3)得

$$\sigma k_{1\nu-1\nu}^{co-cl} L = \arcsin \sqrt{R_0} \quad (8)$$

当 $R_0 = 1$ 时

$$L_0 = \pi/2\sigma k_{1\nu-1\nu}^{co-cl} \quad (9)$$

此时为带阻滤波器, 最大损耗率为 1.

一般用 3 dB 带宽来表示滤波器的带宽, 设中心波长为 λ_0 , 3 dB 带宽为 $\Delta\lambda$. 在边界波长 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda/2$ 处有 $R = 0.5$. 设 $x = \Delta\beta(\lambda)/2k_{1\nu}$, 由(3)可以得到

$$2\sin^2(\sqrt{1+x^2}\arcsin\sqrt{R_0}) = 1+x^2 \quad (10)$$

这是一个超越方程, 有唯一解 x_0 (如当 $R_1 = 1$ 时, $x_0 = 0.7987$), 于是得

$$\Delta\beta(\lambda_0 \pm \Delta\lambda/2) = 2x_0\sigma k_{1\nu-1\nu}^{co-cl}$$

利用 $\Delta\beta(\lambda_0) = 0$ 和(1)、(7)得

$$|s_1 + \sigma s_2'| \Delta\lambda = 4x_0\sigma k_{1\nu-1\nu}^{co-cl} \quad (11)$$

由式(11)可知, LPFGs 的谱宽度和光栅周期没有直接关系, 主要和模序与折射率改变量有关. 对一阶高次包层模, s_1 较大, 可以得到带宽较小的 LPFGs.

对一定的包层模, 栅长 L 对谱结构起着重要的影响. 当 $L < L_0$ 时, 最大损耗率会变小, 损耗峰较为平坦. 当 $L > L_0$ 时会有较多的旁瓣, 并会出现多峰结构 (过耦合). 因此当 LPFGs 用于带阻滤波器时, $R_0 = 1$, 栅长 L 应为 L_0 , 当用于 EDFA 增益平坦时, $R_0 < 1$, 根据上述方法求出, 必然有 $L < L_0$.

3 实验与分析

为了检验上述理论与实验结果的符合情况, 我们对所制作的 LPFG 的谱特性进行了分析. 利用普通的单模光纤 (Corning SMF-28) 经过载氢一周后, 使用振幅掩模板和紫外激光写入法, 制做了周期为 $450 \mu\text{m}$ 的 LPFG, 长度为 $L = 3.8 \text{ cm}$, 所用的紫外光源是波长为 193 nm 的准分子激光器, 频率为 10 Hz , 功率为 100 mJ/pulse . 为了使之有较好的稳定性, 进行了退火处理.

图5是利用光谱仪观察到的前4个损耗峰的光谱图, 分别对应包层模序 1、3、5 和 7. 测得对应模序

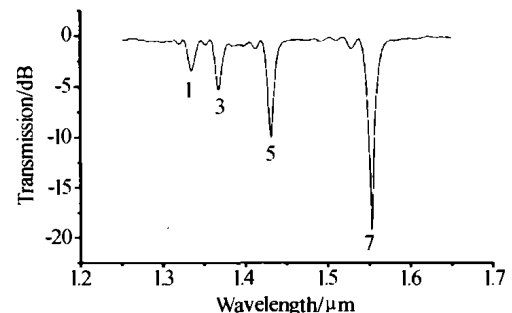


图5 LPFG 的透射谱, 4 个损耗峰分别对应模序 1、3、5 和 7. Fig. 5 Transmission spectrum of LPFG with the period $450 \mu\text{m}$. Four loss peaks correspond the cladding mode order, 1, 3, 5 and 7, respectively

为 7.5 和 3 的包层模的损耗峰 3 dB 带宽分别约为 14.4 nm、11.2 nm 和 7.5 nm. 最小透射率分别为 -19 dB、-10 dB 和 -5.1 dB, 转换为 R_0 分别为 0.987、0.9 和 0.691.

从理论上说, 对不同模序的损耗峰, 根据 R_0 和 L 的值, 利用式(8), 求出的 σ 应该相同, 但计算表明, 利用模序为 1 得到的 σ 差别较大, 而另外 3 个较接近, 取后三个的平均值为 $\sigma = 0.7833 \times 10^{-4}$. 利用式(10)可以得到与这三个 R_0 对应的 x_0 分别为 0.8684、0.9709 和 0.9525, 由式(11)可以得到模序为 3、5 和 7 的损耗峰的 3 dB 带宽 $\Delta\lambda$ 约为 11.9 nm、10.0 nm 和 6.7 nm.

可以看出, 实验得到的 3 dB 带宽, 和理论结果较为接近, 但都比理论结果大一些. 从总体上反映了在模序较小时, 随模序增加, 谱宽变大的特点. 理论和实验的差别, 原因可能是, 紫外写入的 LPFGs 的折射率分布不是理想的正弦分布, 从而引入了谐波造成的. 本质上说, 理论结果是在均匀的正弦分布条件下得到的, 实际上, 在写入时, 这一条件是较难严格满足的. 从理论上来说, 模的色散也可能使谱变宽. 线性化处理, 也可能是理论结果偏小的原因之一.

4 结论和说明

在通信和传感领域, 不同的应用背景, 对 LPFGs 的谱结构有不同的要求, 能够按给定的损耗率和带宽确定出有关参数具有重要意义. 本文研究了导模和不同包层模耦合产生的透射谱特性. 在耦合系数和栅长一定的情况下, 当模序从 1 变化到某一模序时(在本文的光纤参数下, 这一模序为 19), 谱宽度逐渐增加, 在该模序附近有很宽的谱结构, 以后随模序的增加, 谱宽度又迅速减小. 和 Bragg 光纤光栅相比, LPFGs 具有丰富的谱特性, 利用不同的包层模, 可以设计出适用于不同目的的滤波器、增益均衡器、光纤光栅传感器等光纤器件. 结合耦合系数和栅长的控制, 可以设计出一定中心波长、带宽和损耗的滤波器.

本文的结论对设计和制做 LPFGs 时, 有关栅长、周期、耦合系数(折射率改变量)等关键参数的选取提供理论参考.

参考文献

- Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, *et al.* Long-period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters. *J Lightwave Technology*, 1996, **14**(1): 58 ~ 65
- Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins B J, *et al.* Long-period fiber-grating-based gain equalizers. *Optics Letters*, 1996, **21**(5): 236 ~ 238
- Shu Xuewen, Zhang Lin, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings. *J Lightwave Technology*, 2002, **20**(2): 255 ~ 266
- Harumoto M, Shigehara M, Sukanurna H. Gain-flattening filter using long-period fiber gratings. *J Lightwave Technology*, 2002, **20**(6): 1027 ~ 1033
- Patrick H, Kersey A, Bucholtz F. Analysis of the response of long period fiber grating to external index of refraction. *J Lightwave Technology*, 1998, **16**(9): 1606 ~ 1612
- Erdogan T. Cladding-mode resonance in short- and long-period fiber grating filters. *J Opt Soc Am A*, 1997, **14**(8): 1760-1773
- 宋宁, 郭晓金, 殷宗敏. 长周期光纤光栅的分析和优化设计. *光子学报*, 2003, **32**(6): 735 ~ 737
Song N, Guo X J, Yin Z M. *Acta Photonica Sinica*. 2003, **32**(6): 735 ~ 737
- Kong M, Tong, Wei H, Zhou W. Cladding mode resonances in long-period fiber gratings. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(5): 433 ~ 437
- Vasiliev S A, Dianv E M, Varelas D, *et al.* Postfabrication resonance peak positioning of long-period grating cladding-mode-coupled gratings. *Optics Letters*, 1996, **21**(22): 1830 ~ 1832
- MacDougall T W, Pilevar S, Haggan C W, *et al.* Generalized expression for the growth of long period gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(10): 1449 ~ 1451
- Snyder A W, Love J D. *Optical Waveguide Theory*, New York: Chapman and Hall, 1983. 542 ~ 552
- 彭江得. 光电子技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1988. 309 ~ 313
Peng J D. *Basic for Photoelectron Technology*. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. 309 ~ 313
- 朱涛, 饶云江, 冉曾令, 等. 一种基于新型长周期光纤光栅的动态增益均衡器. *光子学报*, 2003, **32**(3): 283 ~ 285
Zhu T, Rao Y J, Ran Z L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 283 ~ 285

Investigation of the Spectral Structures of Long-period Fiber Gratings (LPFGs)

Zhang Zijia^{1,3}, Shi Wenkang¹, Gao Kan², Fang Zujie²

1 Dept. of Information Measurement Technology and Instrument, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

2 Lab of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

3 Zhengzhou Aeronautical Institute of Industrial Management, Zhengzhou 450052

Received date: 2003-09-28

Abstract Long-period fiber gratings (LPFGs) used in different fields of the fiber communication and sensing are required to possess different properties. The spectral characteristics of LPFGs are investigated theoretically and experimentally by using the phase matching condition. The structures of the transmission spectra are very different when the core mode is coupled to different cladding modes. For lower-order cladding modes, the spectra are narrower. With the increase of the mode orders, the transmission spectra become wider. There is a critical mode order whose spectrum comes to a maximum. Then when the mode order increases, the bandwidth decreases quickly. The relationship between the maximal loss rate, 3dB bandwidth of the spectrum and the cladding mode order, grating length, coupling coefficient and period is derived. By controlling of the coupling coefficient, length, and the selection of the cladding modes, LPFGs with very wide or narrow spectrum used as gain equalizers or band-rejection filter can be designed.

Keywords Fiber optics; Long-period fiber gratings (LPFGs); Optical filters; Gain equalizers; Spectral bandwidth

Zhang Zijia was born in 1964 in Henan Province. He received his B. S. degree from Henan Normal University in 1988, and M. S. degree from Northwest University in 1991. Now he is a Ph. D. candidate at the Dep. of Information Measurement Technology and Instrument, Shanghai Jiaotong University. His current interests are fiber sensor and new measurement technology.

