

光子晶体光纤中级联长周期光栅双谐振 波长干涉的研究

王 智 张丽梅 王 晶 余凯球

(北京交通大学理学院光信息所, 北京 100044)

摘要 通过分析单模光纤 SMF 中的 LPG 对的传输特性及几个因素对干涉透射谱的影响,并结合前期工作,主要研究光子晶体光纤(PCF)中的 LPG 对在 1665 nm 附近 U 波段传输特性。结合光栅耦合强度与波长的关系以及拍长与波长的关系,对 PCF 中 LPG 对的参数进行选择设计,得到双谐振波长的干涉谱,级联 LPG 对构成的 MZI 干涉光谱在两个谐振波长处由于耦合强度不同而不同。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;级联长周期光栅;双谐振;干涉

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2909

Dual Resonance Interference of Cascaded LPG Inscribed in Photonic Crystal Fiber

Wang Zhi Zhang Limei Wang Jing Yu Kuanglu

(Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The propagation properties of the long-period fiber grating (LPG) pair in standard single-mode fiber (SMF) are discussed including some factors affecting the interference transmission spectra, and the characteristics of the LPG pair in the photonic crystal fiber (PCF) at the U-band near 1665 nm are investigated in detail. A dual resonance interference spectrum is obtained after the structural parameters of the LPG pair in PCF are designed based on the relation between coupling strength and the beat length as well as the relation between beat length and wavelength. The spectra at both resonance wavelength are different due to the different coupling strength.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; cascaded long-period grating; dual resonance; interference

1 引 言

光纤型 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)通常由两个 3 dB 光纤耦合器和它们之间的光纤构成,是一种全光纤结构^[1]。环境温度、应力等参量的微小变化即可改变两个干涉臂的相位关系,因此,光纤型 MZI 广泛应用于光纤传感与测量。采用相位补偿^[2]或者在同一光纤中实现 MZI 结构(在线 MZI)^[3~7],可解决光纤型 MZI 的稳定性问题。

在单模光纤(SMF)中利用紫外曝光写入一对长周期光栅(LPG)对,光纤中传输的基模 LP_{01} 经过第一个 LPG 后,部分能量耦合到包层模 LP_{0m} , LP_{01} 和 LP_{0m} 模式的传输常数不同,在同一段光纤中传输

会产生相位差,经过第二个 LPG 时,两个模式再次耦合,经单模光纤输出的光信号与两个模式之间的相位差有关。这种结构等效于一个 MZI,其中的 LPG 相当于耦合器。光纤在线 MZI 的传输特性与 LPG 的基模耦合损耗、光栅长度 d 、LPG 之间的间隔 L 等参数有关^[4~6]。基于光纤在线 LPG 对结构的 MZI,可应用于光纤传感、光纤通信和光信号处理等方面^[8]。文献[9]在掺铒光纤上写入 LPG 对,应用于光传感和光通信,结合光纤中的交叉相位调制(XPM)效应,文献[10]利用 LPG 对实现了全光逻辑门,文献[11]用一根掺铒光纤连接两个对称的 LPG 构成新型的全光开关。

收稿日期: 2008-11-30; **收到修改稿日期**: 2008-12-26

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z270)、国家自然科学基金(60577020)、教育部新世纪优秀人才支持计划和教育部光通信和光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助课题。

作者简介: 王 智(1971-),男,博士,教授,主要从事光纤通信、光纤传感、光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn. (中国光学学会会员号: S040421081S)

在光子晶体光纤(PCF)中改变玻璃结构^[12]、使空气孔周期性物理形变^[13]、或激励声波弯曲波^[14]等可写入LPG。实验发现PCF中的LPG谐振波长随光栅周期增大而蓝移,与SMF中的性质相反^[12~16]。我们曾从理论上指出PCF中的LPG存在双谐振波长^[17]。文献[18]将3段PCF错位熔接,或者在一根PCF的两个位置使空气孔熔缩,实现了在线MZI,文献[19]在PCF中利用高温慢拉锥工艺制作两个锥形耦合区,形成MZI结构,文献[20]在PCF的两个位置分别施加周期性压力形成类似普通单模光纤中LPG级联的MZI。但是这些研究都没有考虑双谐振波长的特点。

因此,结合我们前期工作,在SMF中的LPG对的基础上,本文主要分析PCF中的级联LPG对的传输特性,包括双谐振波长干涉谱,光栅耦合强度随

波长的变化,并基于此对PCF中LPG对简单设计,而且本文关注1665 nm附近U波段的特性。

2 级联LPG对的透射系数

图1是光纤中一对LPG构成的MZI原理结构图,基模LP₀₁经过一对LPG传输后,LP₀₁和LP_{0m}模式的振幅可表示为^[6]

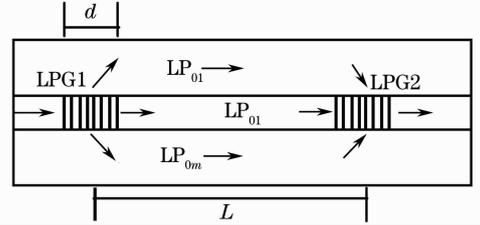


图1 LPG对构成的MZI

Fig. 1 MZI based on LPG pair

$$\begin{bmatrix} a_{01} \\ a_m \end{bmatrix} = \exp[j(\beta_{01} + \beta_m)d] \begin{bmatrix} \exp(jKd/2) & 0 \\ 0 & \exp(-jKd/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_2 & r_2 \\ r_2 & t_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\beta_{01}L) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta_mL - \alpha_mL) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(jKd/2) & 0 \\ 0 & \exp(-jKd/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 & r_1 \\ r_1 & t_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 t 和 r 分别为LP₀₁和LP_{0m}模式的透射系数, $|t|^2$ 和 $|r|^2$ 分别为相应模式的透射率,且 $|t|^2 + |r|^2 = 1$,下标1和2分别对应LPG1和LPG2, $K = 2\pi/\Lambda$ (Λ 为光栅周期), β_{01} 和 β_m 为两模式的传输常数, L 为光栅间光纤的长度, α_m 为模式LP_{0m}的损耗系数。本文忽略LPG区域光纤的模式损耗,并认为两个LPG处的模式耦合系数相同。 $|a_{01}|^2$ 即为级联LPG对的基模透射谱函数,可写作

$$|a_{01}|^2 = |t_1|^2 |t_2|^2 + |r_1|^2 |r_2|^2 \exp(-2\alpha_mL) + \exp(-\alpha_mL) \{ t_1 t_2 r_1^* r_2^* \exp[j(\beta_{01}L - \beta_mL + Kd)] + \text{C. C.} \}, \quad (2a)$$

如果两个LPG完全相同,且忽略所有的模式损耗,则可简化为

$$|a_{01}|^2 = |t|^4 + |r|^4 + r^2 \{ t^2 \exp[j(\beta_{01}L - \beta_mL + Kd)] + \text{C. C.} \}. \quad (2b)$$

对每个LPG, LP₀₁和LP_{0m}模式的透射系数 t 和 r 都可写为

$$t = \cos(s_m d) + j \frac{\delta_m}{s_m} \sin(s_m d), r = j \frac{\kappa_m}{s_m} \sin(s_m d), s_m = \sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2},$$

$\delta_m = (\beta_{01} - \beta_m - K)/2$ 为LPG的波长失谐量, δ_m 反映LP₀₁模式和包层LP_{0m}模式的相位匹配关系, κ_m 为两模式之间的耦合系数, $\kappa_m d$ 为光栅耦合强度(假设两个LPG长度相同)。耦合系数 κ_m 可由下式计算:

$$\kappa_m = \frac{4\pi^2 n_1 \delta n_{\text{mod}}}{\lambda \sqrt{\beta_{01} \beta_m}} \frac{\iint_A dx dy e_{01,t}(x,y) \cdot e_{m,t}(x,y)}{\sqrt{\iint_{-\infty}^{\infty} dx dy |e_{01,t}(x,y)|^2} \cdot \sqrt{\iint_{-\infty}^{\infty} dx dy |e_{m,t}(x,y)|^2}}, \quad (3)$$

其中 δn_{mod} 是光栅的折射率调制, n_1 是光纤芯区折射率, $e_{01,t}$ 和 $e_{m,t}$ 是两个模式的横向电场, A 表示在光栅区域积分。

3 SMF中的LPG对

当谐振波长处耦合强度为 $\pi/4$ 时,单个LPG的

透射率为1/2,级联的LPG对在谐振波长处形成可见度最好的干涉光谱^[4]。SMF中写入周期为529.1 μm 的LPG,调整光栅结构参数,使1665 nm处耦合强度为 $\pi/4$, LP₀₁模与LP₀₄模耦合透射谱如图2,忽略包层模损耗。

为了定量描述LPG对的MZI干涉谱,根据图2

的透射谱按下式定义可见度 V ：

$$V = |a_{01\lambda_1}|^2 - |a_{01\lambda_2}|^2, \quad (4)$$

其中 $|a_{01\lambda_1}|^2$ 和 $|a_{01\lambda_2}|^2$ 分别为波长 $\lambda_1 = 1674.58 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1664.22 \text{ nm}$ 处(即 1665 nm 附近相邻的波峰和波谷)的基模透射系数。

忽略所有的模式损耗,假设 LPG1 的耦合强度为 $\pi/4$, 可得 LPG2 的耦合强度 $\kappa_m d_2$ 取不同值的光谱可见度,如图 3(a)所示。图 3(b)显示了两 LPG 的耦合强度都为 $\kappa_m d$, 但不限制为 $\pi/4$ 时的光谱可见度。显然,只有当两 LPG 的耦合强度都为 $\pi/4$ 时,才能使干涉光谱可见度 V 达到最大值。

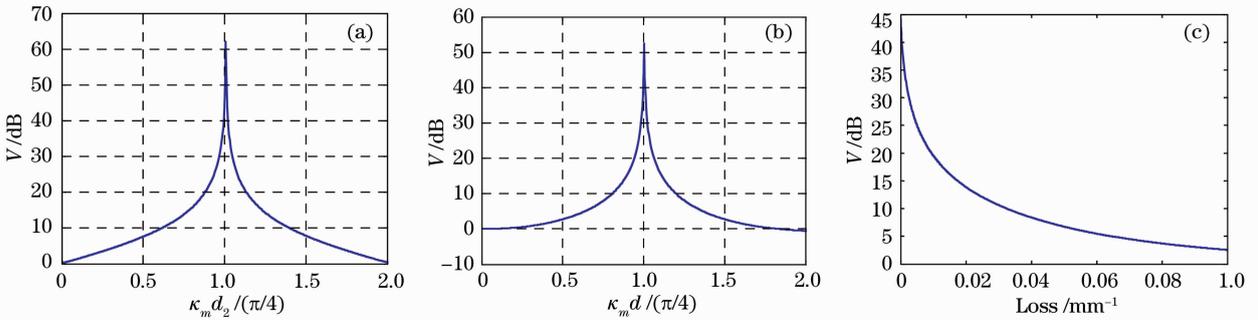


图 3 可见度与 $\kappa_m d_2$ (a), $\kappa_m d$ (b) 和包层模损耗 (c) 的关系

Fig. 3 Relation between the visibility and $\kappa_m d_2$ (a), $\kappa_m d$ (b), cladding mode loss (c)

如果考虑包层模的传输损耗,图 3(c)是两个 LPG 的耦合强度都为 $\pi/4$, 光谱可见度与包层模损耗的关系,显然随着包层模损耗的增大,干涉谱的可见度越来越差。

因此,为了获得可见度高的 LPG 对干涉光谱,应该使级联的两个 LPG 的耦合强度尽量都接近 $\pi/4$, 而且设法降低两个 LPG 之间传输的包层模损耗。

4 PCF 中的 LPG 对

4.1 干涉透射谱

本文研究的 PCF 为纯石英芯结构,包层空气孔周期为 $3 \mu\text{m}$, 空气孔直径为 $0.9 \mu\text{m}$, 图 4(a)是基模

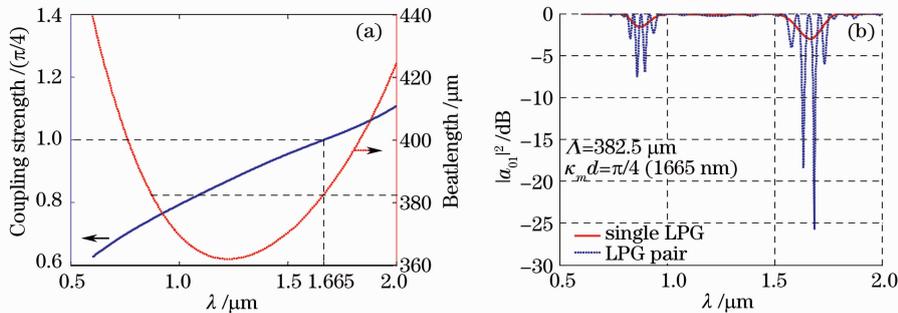


图 4 耦合强度与拍长随波长的变化(a)和 PCF 中单个 LPG 和 LPG 对的透射谱(b)

Fig. 4 Variocation of the coupling strength and beat length against wavelength (a); transmission spectra of a single LPG and LPG pair in PCF (b)

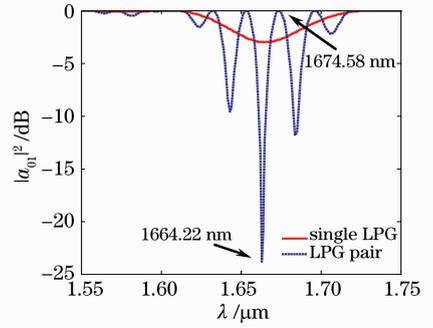


图 2 SMF 中单个 LPG 和 LPG 对的透射谱

Fig. 2 transmission spectra of a single LPG and LPG pair in SMF

LP_{01} 和包层模 LP_{02} 的拍长 L_B 与耦合强度随波长的变化情况。调整 LPG 光栅参数,可使期望波长处的耦合强度为 $\pi/4$, 进而在拍长曲线上即可确定应写入的 LPG 周期,图中约 $382.5 \mu\text{m}$ 。图 4(a)所示,PCF 的拍长曲线有一最小值,约 $362 \mu\text{m}$, 表明使 LP_{01} 模和 LP_{02} 模耦合谐振的 LPG 周期必须大于此数值。一个拍长对应两个不同的谐振波长,即一个 LPG 可产生两个透射损耗峰。但是耦合强度随波长单调增大,因此,不可能使两个谐振波长处的耦合强度同时为 $\pi/4$ 。

图 4(b)是 LPG 周期为 $382.5 \mu\text{m}$, 1665 nm 处

的耦合强度为 $\pi/4$ 时的透射谱。显然单个 LPG 时, 在两个谐振波长 874 nm 和 1665 nm 处都有损耗峰, 而且 1665 nm 处基模透射率恰为 $1/2$, 因而 LPG 对的透射谱在 1665 nm 处可见度高达 25 dB。而短谐振波长处的耦合强度较小, 单个 LPG 透射率约 0.7, 级联的 LPG 对在 874 nm 处可见度仅约 7 dB。

如果改变光栅结构参数使 874 nm 处的耦合强度恰为 $\pi/4$, 这时 LPG 对的透射谱如图 5(a) 所示。874 nm 处的可见度提高到约 23 dB, 但是 1665 nm

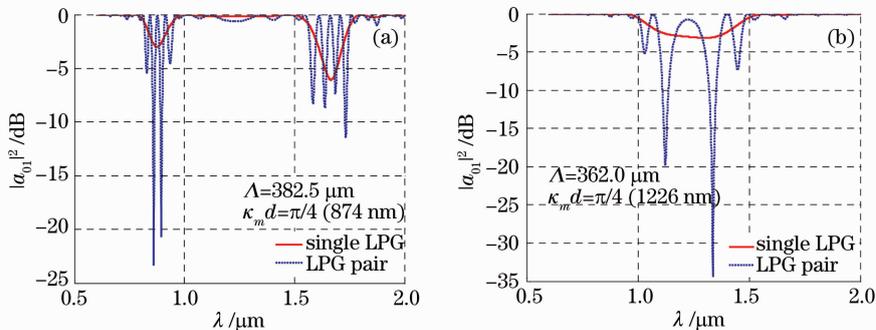


图 5 PCF 中单个 LPG 和 LPG 对透射谱

Fig. 5 The transmission spectra of a single LPG and LPG pair in PCF

4.2 两个谐振波长的特点

PCF 中单个 LPG 透射谱有双谐振波长, 级联 LPG 对在每个谐振波长处都会形成干涉光谱。由于耦合强度不可能同时在两个谐振波长处都为 $\pi/4$, 所以两个谐振波长处的干涉光谱结构一般不同, 调整 LPG 结构参数可以设计不同干涉透射谱, 以适应不同波段的应用。

干涉谱波长条纹间隔 S , 与谐振波长有关, 当光栅调制深度不是很大或者光栅之间的距离比光栅长度要长很多时, 可近似表示为^[6]

$$S \approx \lambda^2 / [(n_{g01} - n_{g0m})L], \quad (5)$$

其中 n_{g01} 和 n_{g0m} 是 LP_{01} 模和 LP_{0m} 模的群折射率。如果忽略群折射率与相折射率的差别, 上式可近似为 $S \approx \lambda \cdot L_B / L$ 。即干涉谱波长条纹间隔近似正比于波长和拍长(在谐振波长处等于 LPG 周期), 与两个 LPG 之间的距离成反比。

因此, 双谐振波长的级联干涉谱的条纹间隔不均匀, 短波长处较小, 长波长处较大。为了便于观察, 本文理论分析时耦合强度通过折射率调制深度来改变, 光栅长度均为 10 mm, 光栅间隔均为 20 mm, 因而干涉谱条纹间隔可达数十纳米, 条纹数量较少。

当 LPG 周期逐渐减小至接近最小拍长时, 双谐

处的可见度仅约 8 dB。

如果 LPG 的周期接近最小拍长, 两个谐振波长靠近, 导致单个 LPG 的透射谱连通, 图 5(b) 是 LPG 周期为 362.0 μm (最小拍长)时的透射谱, 谐振波长 1226 nm 处的耦合强度为 $\pi/4$ 。显然, 单个 LPG 的双谐振波长透射谱连通后损耗峰很宽, 级联 LPG 对的干涉谱可见度在谐振波长左侧约 20 dB, 右侧超过了 30 dB。

振波长干涉谱连通, 不仅单个 LPG 的透射谱很宽, 而且级联 LPG 对干涉谱的波长条纹间隔增大。

5 结 论

PCF 中的 LPG 具有双谐振波长, 级联 LPG 对构成的 MZI 干涉光谱在两个谐振波长处由于耦合强度不同而不同, 光谱可见度、干涉波长条纹间隔等都不同。SMF 中 LPG 对可见度影响因素的结论同样适用于本文分析的 PCF 情况。PCF 的 LPG 对结构可用于应力、温度传感, 也可用于光滤波器或衰减器等无源器件, 进一步可用于全光信号处理。本文主要给出了 U 波段 1665 nm 附近的传输特性, 这些结果可为目前研究较少的 U 波段器件研究提供参考。

参 考 文 献

- 1 Gu Wanyi. Ultra Long Distance WDM Optical Fiber Transmission Technology[M]. Beijing: press, 2006
- 2 Huang Tao. Optical Fiber Mach-Zehnder Interferometer and the Phase Compensation[D]. Beijing Jiaotong University, 2007
- 3 E. M. Dianov, S. A. Vasiliev, A. S. Kurkov et al.. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings [C]. ECOC' 1996, Oslo, Norway, MoB. 3. 6

- 4 Cui Liping, Wu Yaming. The spectra properties of cascaded long period fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1019~1024
崔丽萍, 吴亚明. 级联长周期光栅光谱特性[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1019~1024
- 5 Byeong Ha Lee, Un-Chul Pae. Multislit interpretation of cascaded fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technology*, 2002, **20**(9): 1750~1761
- 6 Byeong Ha Lee, Junji Nishii. Dependence of fringe spacing on the grating separation in a long-period fiber grating pair [J]. *App. Opt.*, 1999, **38**(16): 3450~3459
- 7 Chen Shaohua, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Theory and experiment of increasing the extinction ratio of the cascaded long period gratings utilizing the fiber loop mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1788~1791
陈少华, 赵启大, 刘丽辉 等. 利用光纤环形镜提高级联长周期光栅干涉谱消光比的理论和实验分析 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1788~1791
- 8 ByoungHo Lee, Yong Wook Lee, Jaehoon Jung. Applications of long period fiber grating pair interferometers for sensors and communications [C]. *IEEE, LEOS 2002, Glasgow*. TuE1
- 9 Yong Wook Lee, Jaehoon Jung, ByoungHo Lee. Polarization-sensitive interference spectrum of long-period fiber grating pair separated by erbium-doped fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9): 1312~1314
- 10 Yoonchan Jeong, Seungin Baek, ByoungHo Lee. All-optical signal gating in cascaded long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9): 1216~1218
- 11 Li Chunfei, Zang Zhigang. Optical switching in a nonlinear-fiber connected long-period fiber grating pair [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1919~1923
李淳飞, 臧志刚. 用非线性光纤连接的长周期光栅对的光开关特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1919~1923
- 12 B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, R. S. Windeler *et al.*. Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1460~1462
- 13 N. Grootthoff, J. Canning, E. Buckley *et al.*. Bragg gratings in air-silica structured fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 233~235
- 14 Katsumi Morishita, Yoshihiro Miyake. Fabrication and resonance wavelengths of long-period gratings written in a pure-silica photonic crystal fiber by the glass structure change [J]. *J. Lightwave Technology*, 2004, **22**(2): 625~630
- 15 Martin Dybendal Nielsen, guillaume Vienne, Jakob Riis Folkenberg *et al.*. Investigation of micro deformation-induced attenuation spectra in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4): 236~238
- 16 A. Diez, T. A. Birks, W. H. Reeves *et al.*. Excitation of cladding modes in photonic crystal fibers by flexural acoustic waves [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(20): 1499~1501
- 17 Wang Zhi, Ju Jian, Wei Jin *et al.*. Scaling property and multi-resonance of PCF-based long period gratings [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6252~6257
- 18 Hae Young Choi, Myoung Jin Kim, Byeong Ha Lee. Compact all-fiber Mach-Zehnder interferometers formed in photonic crystal fiber [C]. *OFC 2007, JThA8*
- 19 Joel Villatoro, Vladimir P. Minkovich, David Monzón-Hernández. Compact modal Interferometer built with tapered microstructured optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(11): 1258~1260
- 20 Jong H. Lim, Hyun S. Jang, Kyung S. Lee *et al.*. Mach-Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 346~348