

两个长周期光纤光栅级联透明现象研究

阮 隽 张伟刚 耿鹏程 张珊珊 李晓兰

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 提出栅格周期、光栅长度、级联间距不同的两个长周期光纤光栅级联(CLPG)模型,采用传输矩阵法和耦合模理论对两个长周期光纤光栅级联的光谱特性进行了研究。理论分析表明,级联间距对 CLPG 透射谱损耗峰的位置影响很小;在一定波长范围内,对特定结构的 CLPG,其数值模拟的透射谱为一条直线,出现“光栅透明”现象;依据建立的理论模型,分析并推导出“光栅透明”条件。在 CLPG 写制实验中,适当调整光栅周期和光栅长度,使其满足“光栅透明”条件,测量光谱显示 CLPG 透射率几乎为 0 dB,实验证明了“光栅透明”现象的存在。

关键词 光栅;级联长周期光栅;光栅周期;透射谱;光栅透明

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0705004

Research Transparent Characteristics of Two Cascaded Long-Period Gratings

Ruan Juan Zhang Weigang Geng Pengcheng Zhang Shanshan Li Xiaolan

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics of Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract The model of two long-period gratings cascaded with different periods, lengths and gap is proposed. The transmission spectrum is analyzed by utilizing transfer matrix and coupled-mode theory. Theoretical analysis indicates the gap of cascaded long-period gratings (CLPG) has the least effect on the position of loss peaks. In certain wavelengths region the simulative spectrum is a straight line for particular structure of CLPG. The transparent phenomom is observed and the condition of gratings transparency is obtained according to the model proposed. The transmissivity of CLPG is almost 0 dB as the periods and lengths of gratings are properly adjusted to match the transparent condition. The transparent phenomom is verified by experiment.

Key words gratings; cascaded long-period gratings; gratings period; transmission spectrum; gratings transparency

OCIS codes 350.2770; 200.4490; 130.6750; 140.3510

1 引 言

根据耦合模理论,长周期光纤光栅(LPG)将同向传输纤芯基模耦合到包层模,可感测外界媒质的变化^[1~3],可用于温度、弯曲、扭曲等参量的测量^[4~7]。而级联长周期光栅(CLPG)是在一根光纤上间隔一定距离写制两个(或多个)长周期光栅,其光传输机理是当纤芯中传输的光经过第一个长周期

光栅后,一部分能量被耦合到包层中,纤芯和包层中的光经过一定长度的级联距离后传输到第二个长周期光栅,包层中的能量部分(或全部)重新耦合回纤芯。纤芯和包层中传输的光由于经历了不同路径,在第二个光栅处耦合将产生干涉,其透射谱出现一系列线宽窄、精细度高的损耗峰,故其在光通信和传感领域具有广阔的应用。如使用 CLPG 制作密集

收稿日期: 2011-01-21; **收到修改稿日期:** 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(10974100, 10674075, 60577018)、天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(10JCZDJC24300)和光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题资助课题。

作者简介: 阮 隽(1975—),男,博士研究生,主要从事光子技术及光通信等方面的研究。

E-mail: rj2010@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 张伟刚(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

波分复用光隔离滤波器,在 60 ns 带宽内则有 20 多个等间隔损耗峰^[8]。使用非对称曝光制作的 CLPG,可构建多波长开关型掺铒光纤激光器^[9]。利用双包层光纤构成 CLPG,能够实现对温度和折射率的同时测量^[10]。基于可调 CLPG 的多波长拉曼光纤环形激光器,改变 CLPG 的光栅长度、光栅周期可实现对激光器间隔频率的调制^[11]。

在 CLPG 的写制实验中,对特定结构级联的长周期光纤光栅测量发现:当激光的能量调节到很高时,光谱仪仍然显示为一条直线而未出现损耗峰,把这种现象称之为“光栅透明”现象。为从理论上解释这一现象,本文提出了光栅周期、光栅长度及级联间距不同的两个长周期光纤光栅级联的模型,并采用传输矩阵法及耦合模理论研究光栅参数变化对 CLPG 光谱的影响。计算表明,当栅格周期、光栅长度及传输波长等参数满足“光栅透明”条件时,CLPG 透射率几乎为 1,模拟的光谱为一直线,即光无损耗地通过 CLPG。“光栅透明”现象是 CLPG

设计及应用时应该避免的;同时说明适当控制级联光纤光栅透射率,可以获得有效的光控效果,这对研制高性能的级联光子器件具有重要的指导意义。

2 CLPG 的谱特性研究

2.1 理论模型构建

两个不同的长周期光纤光栅(栅格周期和光栅长度不同)LPG1、LPG2 级联模型如图 1 所示。其中 L_1 、 L_2 分别为 LPG1、LPG2 的长度, d 为两个光栅的间距。

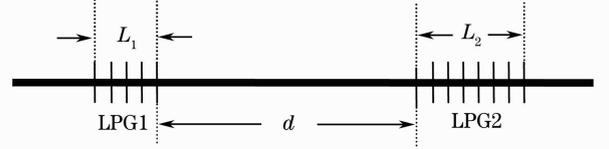


图 1 两个不同长周期光纤光栅级联模型示意图

Fig. 1 Schematics of two cascaded LPGs model

图 1 中光从左入射经过 LPG1 后,其纤芯基模和包层模的幅度为^[12]

$$\begin{bmatrix} a_{co}(L_1) \\ a_{cl}(L_1) \end{bmatrix} = \exp\left(i \frac{\beta_{co} + \beta_{cl}}{2} L_1\right) \begin{bmatrix} \exp\left(i \frac{K_1 L_1}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i \frac{K_1 L_1}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \exp\left(i \frac{\theta_1}{2}\right) & ir_1 \\ ir_1^* & t_1 \exp\left(-i \frac{\theta_1}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}(0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 β_{co} 和 β_{cl} 分别为纤芯基模和包层模的传播常数, K_1 为光栅常数, $K_1 = 2\pi/\Lambda_1$, Λ_1 为光栅周期, $r_1 = \kappa_1 \sin(s_1 L_1)/s_1$ 为包层模的振幅, $s_1 = \sqrt{\kappa_1 \kappa_1^* + (\delta\beta_1/2)^2}$ 为与光栅有关的常数, $\theta_1 = 2\arctan[\delta\beta_1 \tan(s_1 L_1)/(2s_1)]$ 为光经过 LPG1 产生的相移, t_1 为纤芯基模的振幅, $t_1 = \sqrt{1 - r_1 r_1^*}$, κ_1 为光栅的耦合系数, $\delta\beta_1$ 为失谐量, $\delta\beta_1 = \beta_{co} - \beta_{cl} - K_1$ 。

从 LPG1 出射后的光经过长为 d 的光栅间距后,纤芯基模和包层模幅度为

$$\begin{bmatrix} a_{co}(L_1 + d) \\ a_{cl}(L_1 + d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(i\beta_{co}d) & 0 \\ 0 & \exp(i\beta_{cl}d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{co}(L_1) \\ a_{cl}(L_1) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} a_{co}(L_1 + d) \\ a_{cl}(L_1 + d) \end{bmatrix} = \exp\left(i \frac{\beta_{co} + \beta_{cl}}{2} L_1\right) \begin{bmatrix} t_1 \exp\left(i \frac{k_1 L_1 + \theta_1 + 2\beta_{co}d}{2}\right) & ir_1 \exp\left(i \frac{k_1 L_1 + 2\beta_{co}d}{2}\right) \\ ir_1^* \exp\left(-i \frac{k_1 L_1 - 2\beta_{cl}d}{2}\right) & t_1 \exp\left(-i \frac{k_1 L_1 + \theta_1 + 2\beta_{cl}d}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}(0) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

从 LPG2 出射的光,其纤芯基模和包层模幅度为

$$\begin{bmatrix} a_{co}(L_1 + d + L_2) \\ a_{cl}(L_1 + d + L_2) \end{bmatrix} = \exp\left(i \frac{\beta_{co} + \beta_{cl}}{2} L_2\right) \begin{bmatrix} t_2 \exp\left(i \frac{k_2 L_2 + \theta_2}{2}\right) & ir_2 \exp\left(i \frac{k_2 L_2}{2}\right) \\ ir_2^* \exp\left(-i \frac{k_2 L_2}{2}\right) & t_2 \exp\left(-i \frac{k_2 L_2 + \theta_2}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{co}(L_1 + d) \\ a_{cl}(L_1 + d) \end{bmatrix} = \exp\left[i \frac{\beta_{co} + \beta_{cl}}{2} (L_2 + L_1)\right] \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}(0) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\theta_2 = 2\arctan[\delta\beta_2 \tan(s_2 L_2)/(2s_2)]$ 光经过 LPG2 产生的相移,参数 A_{11} , A_{12} , A_{21} 和 A_{22} 分别为

$$A_{11} = t_1 t_2 \exp\left(i \frac{k_1 L_1 + \theta_1 + 2\beta_{co} d + k_2 L_2 + \theta_2}{2}\right) + ir_1^* r_2 \exp\left(i \frac{k_2 L_2 + 2\beta_{cl} d - k_1 L_1}{2}\right), \quad (5)$$

$$A_{12} = ir_1 t_2 \exp\left(i \frac{k_1 L_1 + 2\beta_{co} d + k_2 L_2 + \theta_2}{2}\right) + it_1 r_2 \exp\left(i \frac{k_2 L_2 - 2\beta_{cl} d - k_1 L_1 - \theta_1}{2}\right), \quad (6)$$

$$A_{21} = it_1 r_2^* \exp\left(i \frac{k_1 L_1 + \theta_1 + 2\beta_{co} d - k_2 L_2}{2}\right) + ir_1^* t_2 \exp\left(-i \frac{k_2 L_2 - 2\beta_{cl} d + k_1 L_1 + \theta_2}{2}\right), \quad (7)$$

$$A_{22} = t_1 t_2 \exp\left(-i \frac{k_1 L_1 + \theta_1 + 2\beta_{cl} d + k_2 L_2 + \theta_2}{2}\right) - r_1 r_2^* \exp\left(i \frac{k_1 L_1 - k_2 L_2 + 2\beta_{co} d}{2}\right). \quad (8)$$

代入初始条件 $a_{co}(0) = 1, a_{cl}(0) = 0$, 可以得到光通过间距为 d 的两个光栅 LPG1、LPG2 级联后的纤芯基模和包层模幅度。于是 CLPG 的透射率为

$$T_{12} = |a_{co}(L_1 + d + L_2)|^2 = \left| t_1 t_2 \exp\left[i \frac{k_1 L_1 + \theta_1 + 2\beta_{co} d + k_2 L_2 + \theta_2 + \beta_{co}(L_1 + L_2) + \beta_{cl}(L_1 + L_2)}{2}\right] + ir_1^* r_2 \exp\left[i \frac{k_2 L_2 + 2\beta_{cl} d - k_1 L_1 + \beta_{co}(L_1 + L_2) + \beta_{cl}(L_1 + L_2)}{2}\right] \right|^2 = |t_1 t_2 \exp(iM) + ir_1^* r_2 \exp(iN)|^2 = (t_1 t_2)^2 + (r_1^* r_2)^2 + 2t_1 t_2 r_1^* r_2 \sin(M - N), \quad (9)$$

式中

$$M = \frac{k_1 L_1 + \theta_1 + 2\beta_{co} d + k_2 L_2 + \theta_2 + \beta_{co}(L_1 + L_2) + \beta_{cl}(L_1 + L_2)}{2}, \quad (10)$$

$$N = \frac{k_2 L_2 + 2\beta_{cl} d - k_1 L_1 + \beta_{co}(L_1 + L_2) + \beta_{cl}(L_1 + L_2)}{2}. \quad (11)$$

当 CLPG 的透射率为 1 时, 即出现了“光栅透明”现象。于是, 令 $T_{12} = 1$ 可得到 CLPG 的透明条件为

$$(t_1 t_2)^2 + (r_1^* r_2)^2 + 2t_1 t_2 r_1^* r_2 \sin(M - N) = 1, \quad (12)$$

式中 $M - N = 2k_1 L_1 + \theta_1 + 2(\beta_{co} - \beta_{cl})d + \theta_2$, 为光经过 L_1, d, L_2 后的相位。将 t_1, t_2 代入(12)式中, 得到

$$|r_1|^2 |r_2|^2 + (r_1^* r_2)^2 + 2r_1 r_2 \sqrt{1 - |r_1|^2} \sqrt{1 - |r_2|^2} \sin(M - N) = |r_1|^2 + |r_2|^2. \quad (13)$$

(13)式表示了在满足光栅透明的条件下, CLPG 的光栅长度、级联间距、光栅周期之间的制约关系。当 $\gamma = M - N = n\pi$ (n 为整数) 时, (13)式可简化为

$$\frac{1}{|r_1|^2} + \frac{1}{|r_2|^2} = 2. \quad (14)$$

由(14)式可知, 当 $|r_1| = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 时, $|r_2| = \infty$ 。 r_1, r_2 之间的变化关系如图 2 所示。

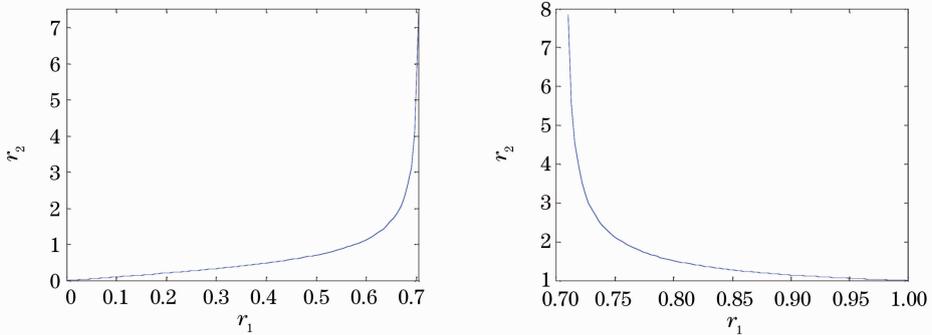


图 2 r_1 和 r_2 之间的关系曲线

Fig. 2 Plot of r_1 versus r_2

由图 2 可知, 当 r_1 在 0.7 附近变化时, r_2 会产生很大变化, 此时 CLPG 光谱对外界微扰很敏感。

2.2 CLPG 光谱特性分析

根据(9)式分析级联间距 d 对 CLPG 透射谱的影响。参数选取: LPG1 和 LPG2 周期分别为 500,

600 μm ; 纤芯折射率 $n_1 = 1.4666$, 包层折射率 $n_2 = 1.4584$, 纤芯半径 $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$, 包层半径 $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ 。仅改变光栅间距而保持其他参数不变, 得到的 CLPG 透射谱如图 3, 4 所示。由这些图中的光谱可见, 当光栅间距取不同数值时, CLPG 透射

谱损耗峰的位置变化很小,这可以从(9)式中的第三个等式得到解释,即前两项之和的值大于第三项的值。

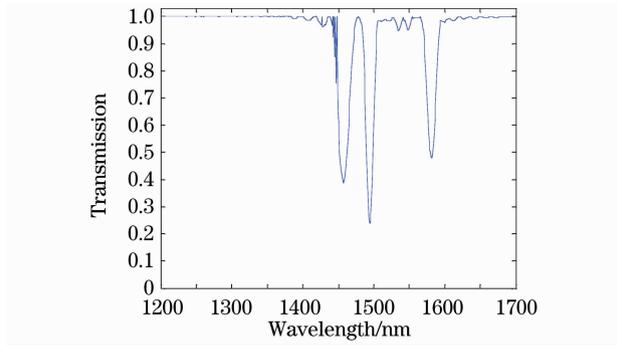


图 3 $d_1 = 10$ mm 时 LPG 级联的模拟透射谱

Fig. 3 Plot of cascaded LPG transmission versus wavelength for $d_1 = 10$ mm

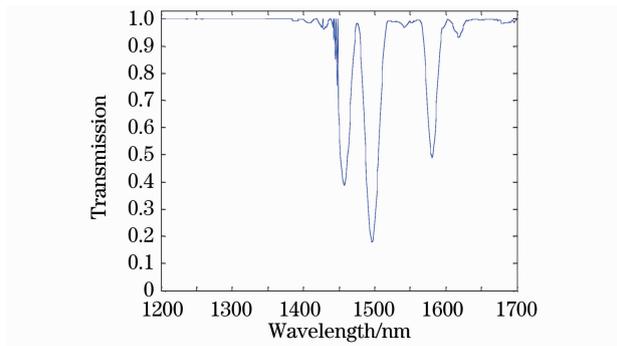


图 4 $d_1 = 20$ mm 时 LPG 级联的模拟透射谱

Fig. 4 Plot of cascaded LPG transmission versus wavelength for $d_1 = 20$ mm

接下来分析“光栅透明”现象。参数选取: LPG1, LPG2 周期和光栅长度分别为 0.25, 10.75 mm; 0.3, 12.3 mm; 光栅间距 $d = 14$ mm; 其他参数同前。得到的 CLPG 透射谱如图 5 所示。由图 5 可见, CLPG 的透射率为 1, 出现了“光栅透明”现象。保持周期不变, 仅改变光栅长度 (0.25,

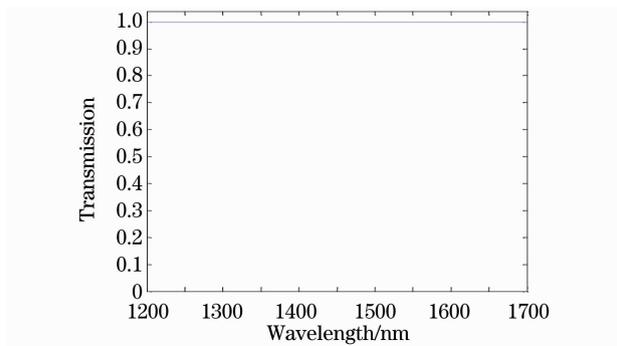


图 5 $d_1 = 14$ mm 的 LPG 级联透射谱

Fig. 5 Plot of cascaded LPG transmission spectrum versus wavelength for $d_1 = 14$ mm

21.5 mm; 0.3, 30 mm), 计算得到的 CLPG 光谱如图 6 所示。同时改变光栅长度和光栅周期 (0.3, 12 mm; 0.35, 17.5 mm), 计算得到的 CLPG 光谱如图 7 所示。从图 6, 7 可知, 光栅长度、栅格周期变化时 CLPG 的透射率仍然为 1。

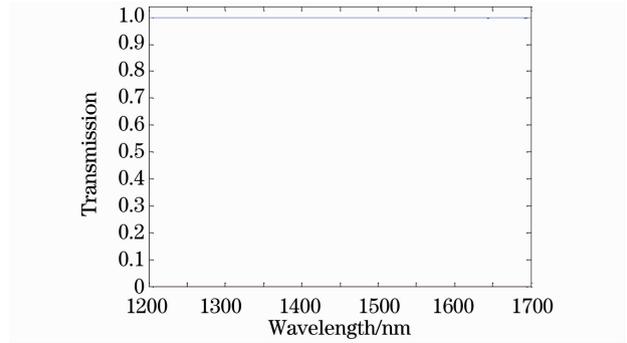


图 6 光栅长度变化时 LPG 级联透射谱

Fig. 6 Cascaded LPG transmission spectrum for grating length change

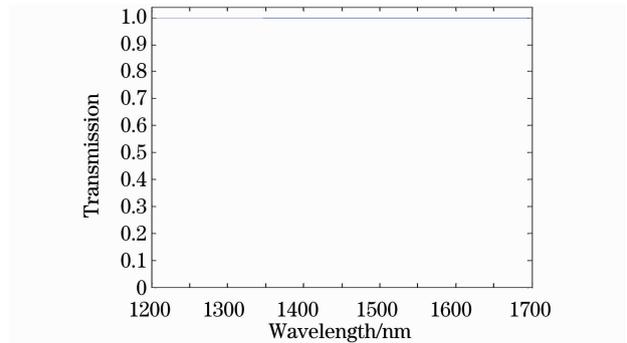


图 7 光栅周期变化时 LPG 级联透射谱

Fig. 7 Cascaded LPG transmission spectrum for grating periods change

3 实验结果与分析

实验中采用型号为 CO₂-H10, 功率为 10 W 的 CO₂ 激光器在单模光纤上写制 CLPG。首先仅改变 LPG 之间的距离写制级联光栅, 用光谱仪 (AQ6317B, 分辨率为 0.01 nm) 测量 CLPG 光谱如图 8, 9 所示。图 8 表示 $d_1 = 10$ mm 的 CLPG 实验谱; 图 9 表示 $d_1 = 20$ mm 的 CLPG 实验谱。对图 8 及图 9 中的光谱分析可知, 光栅级联距离的变化对 CLPG 损耗峰位置影响很小, 这与上述理论分析的结论相符。受光栅写制条件及光纤拉制时的缺陷 (形状、结构) 导致的影响, CLPG 损耗峰的强度有较小差异。

在单模光纤上写入周期和长度分别为 0.25, 10.75 mm 的 LPG1 光栅, 测量光谱如图 10 所示; 然后在单模光纤上写制 LPG2, 其周期和长度分别为

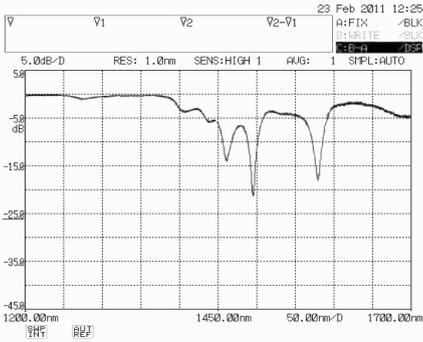


图 8 $d_1 = 10$ mm 的 LPG 级联实验谱

Fig. 8 Cascaded LPG transmission for $d_1 = 10$ mm

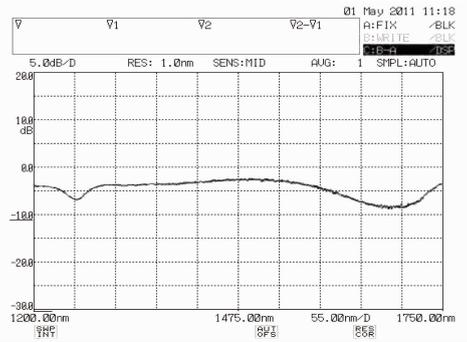


图 11 周期为 0.3 mm 的透射谱

Fig. 11 Transparent spectrum of periods for 0.3 mm

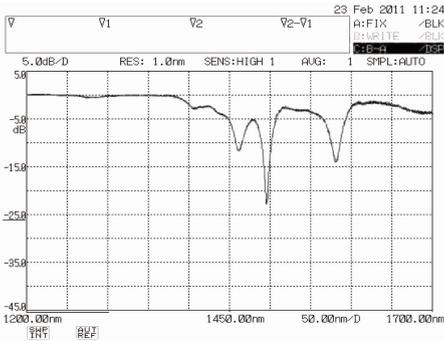


图 9 $d_1 = 20$ mm 的 LPG 级联实验谱

Fig. 9 Cascaded LPG transmission for $d_1 = 20$ mm

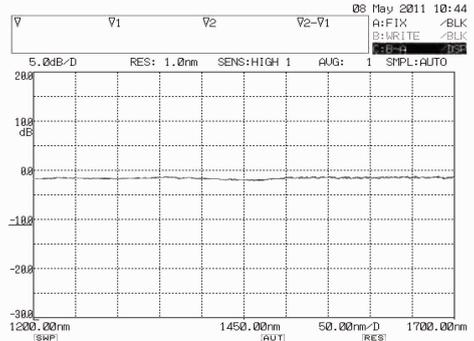


图 12 CLPG 写制实验的透明光谱

Fig. 12 Transparent transmission of cascaded CLPG

0.3, 12.3 mm, 光谱如图 11 所示。由图 10, 11 可知, 单个 LPG 的光谱有损耗峰, 没有出现“透明现象”。最后在单模光纤上写入 CLPG, 测量光谱如图 12 所示。由图 12 可见, 在 1200~1700 nm 波长范围内, CLPG 的透射谱为一条直线, 出现了“光栅透明”现象。实验结果与理论分析相符。实验中保持光栅周期不变, 仅增大光栅长度 (0.25, 16.75 mm; 0.3, 19.8 mm), 或同时改变光栅周期和光栅长度 (0.24, 7.45 mm; 0.25, 7.5 mm) 也出现“光栅透明”现象。总之, 适当调整栅格周期、光栅长度, 可使 CLPG 在一定波长范围内满足透明条件, 出现“光栅透明”现象。

4 结 论

根据耦合模理论, 采用传输矩阵法分析了 CLPG 透射谱的特性, 研究了光栅间距、栅格周期、光栅长度的变化对级联透射谱的影响。理论分析和写制实验表明, 光栅间距的变化对透射谱损耗峰的位置影响很小; 适当调整光栅的参数使其满足“光栅透明”条件, CLPG 出现“光栅透明”现象。对 CLPG 进行优化设计并有效控制其透射率, 可以研制出诸如光衰减器、可控能量耦合器等光器件。本文的研究方法及其结论, 对级联长周期光纤光栅的设计及应用具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 2 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 3 T. Erdogan, J. E. Sipe. Tilted fiber phase gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1996, **13**(2): 296~313
- 4 He Wanxun, Shi Wenkang, Ye Ailun. Long period fiber grating based temperature sensing scheme with high sensitivity [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2002, **15**(1): 60~63
- 何万讯, 施文康, 叶爱伦. 基于长周期光纤光栅的高灵敏度温度传感方案[J]. *传感技术学报*, 2002, **15**(1): 60~63

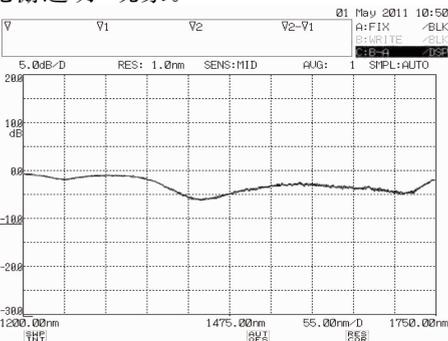


图 10 周期为 0.25 mm 的透射谱

Fig. 10 Transparent spectrum of periods for 0.25 mm

- 5 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of transvers load and temperature using a single long period fiber grating element[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1116~1120
饶云江, 王义平, 冉曾令 等. 单个长周期光纤光栅实现横向负载和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1116~1120
- 6 H. J. Patrick, C. C. Chang, S. T. Vohra *et al.*. Long period gratings for structural bend sensing[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(18): 1773~1775
- 7 Wang Yiping, Rao Yunjiang, Hu Aizi *et al.*. A novel long-period fiber grating torsion sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1096~1099
王义平, 饶云江, 胡爱姿 等. 长周期光纤光栅扭曲传感器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1096~1099
- 8 X. J. Gu. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 509~510
- 9 Ming Yan, Shouyu Luo, Li Zhan *et al.*. Triple-wavelength switchable erbium-doped fiber laser with cascaded asymmetric exposure long-period fiber gratings [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3685~3691
- 10 B. A. L. Gwandu, X. Shu, T. D. P. Allsop *et al.*. Simultaneous refractive index and temperature measurement using cascaded long-period grating in double-cladding fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(14): 695~696
- 11 Y.-G. Han, C.-S. Kim, J. U. Kang. Multiwavelength Raman fiber ring laser based on tunable cascaded long period fiber gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(3): 383~385
- 12 B. H. Lee, Y.-J. Kim, Y. Chang. Analytic solution for cascaded long-period fiber[J]. *IeiceTrahs Communication*, 2001, **E84-C**(5): 621~628