

长周期光纤光栅的级联光谱特性研究

康萍萍

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2023年9月12日; 录用日期: 2023年10月12日; 发布日期: 2023年10月23日

摘要

基于耦合模理论利用传输矩阵法研究级联长周期光纤光栅(Cascaded Long Period Fiber Gratings, CLPG)的光谱特性。结果表明: 选用两个参数相近的长周期光纤光栅(Long Period Fiber Gratings, LPG)级联可以获得更明显的透射谱。周期的增加导致损耗峰向长波方向线性漂移, 可据此实现对特定波长的损耗。长度和折射率调制深度主要影响损耗峰深度, 可以用于调控损耗峰出现极深值点。得到当两个级联LPG的周期为500 μm 、长度为3 cm, 折射率调制深度为0.00014时存在窄而深的最优CLPG损耗峰。该研究结论为分析级联长周期光纤光栅理论和改进传感器件设计应用提供了依据。

关键词

长周期光纤光栅, 级联长周期光纤光栅, 传输矩阵, 光谱特性

Study on Cascaded Spectral Characteristics of Long Period Fiber Gratings

Pingping Kang

College of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Sep. 12th, 2023; accepted: Oct. 12th, 2023; published: Oct. 23rd, 2023

Abstract

Based on the coupled-mode theory, the spectral characteristics of CLPG are studied by using the transfer matrix method. The results show that a more obvious transmission spectrum can be obtained by selecting two LPG cascades with the same parameters. The increase of the period leads to the linear shift of the loss peak to the long wave direction, which can realize the loss of a specific wavelength. Length and refractive index modulation depth mainly affect the peak depth, which can be used to control the extremely deep point in the loss peak. The simulation shows when the period of two cascaded LPG is 500 μm , the length is 3 cm, and the refractive index modulation

depth is 0.00014 the narrow and deep optimal CLPG loss peak is obtained. This research provides a basis for the theory of CLPG and improves the design and application of sensing devices.

Keywords

Long Period Grating, Cascaded Long Period Grating, Transfer Matrix Method, Spectral Characteristics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1996 年 Vengsarkar 等用紫外光通过振幅掩模板照射载氢掺锗光纤制成了长周期光纤光栅[1]。它由向前传输的纤芯模与同向传输的各阶次包层模耦合产生, 耦合到包层的纤芯模在向前传输过程中因包层与环境的不规则性被很快损耗, 透射谱中的部分模强度减弱, 形成损耗峰[2], 一个 LPG 有多个包层模, 可以形成数个损耗峰。目前, 已有许多研究人员基于传统的耦合模理论对 LPG 传输谱进行了仿真分析。2007 年, 陈儒[3]利用简化计算模型解决了多包层有效折射率的仿真求解问题。2014 年, 张奎华[4]得到平均有效折射率和周期数对传输谱的影响。2020 年, 朱雨雨[5]等人较全面的模拟分析了 LPG 的周期、刻写长度以及折射率调制深度与的光栅之间的关系, 为长周期光纤光栅的高精度刻写及透射谱的精确定位提供了参考价值。LPG 也广泛应用于带阻滤波器[6], 掺铒光纤放大器的增益均衡器[7], 及应变[8]、温度[9]、折射率[10]等的单点传感系统。

然而, 相较于 LPG 趋于完善的研究板块, 由 Dianov 等人在 LPG 后一段距离再刻写一个匹配的 LPG, 形成光纤内 Mach-Zehnder 干涉仪结构的级联长周期光纤光栅[11]的谱特性研究还不够全面, 对于分布式传感[12]还有待进一步深入研究。2013 年, 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室匡娅祺[13]等人发现了控制级联光纤长度能调节 CLPG 损耗峰的带宽和间隔, 单个 LPG 的透射率为 3 dB 时的 CLPG 损耗达到最大。2018 年, 高敏[14]等人探究了光栅长度、折射率调制深度、间隔不同时级联后的传输谱特性, 但只着眼于不同参数下损耗峰的变化趋势, 以期减小光栅级联过程中的误差。本文从周期、长度和折射率调制深度三个方面仿真分析了 CLPG 更为全面的光谱特性, 以期 CLPG 实际应用提供依据, 优化光器件设计, 加快分布式 LPG 传感器应用的进程。

2. 耦合模理论

耦合模理论是一种研究透射谱反射谱形状、分布等特性的基本方法。光纤作为一种介质光波导可以将光波限制在内部或表面附近, 引导光波沿确定方向传播。当传播过程中光波受到边界限制, 根据电磁场的边界连续性得到多种可能性解, 分别对应多个传播模式。光纤光栅受到电介质扰动时折射率发生改变, 导致原本正交的纤芯模与包层模发生改变, 不同模间的能量发生交换, 满足耦合条件的光栅谱波长处出现损耗峰。即光纤光栅的耦合模理论。

当 LPG 满足相位匹配条件[15]时, 有

$$\lambda_m = (n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl}) \Lambda, \quad (1)$$

其中 λ_m 为纤芯模与第 m 层包层模耦合所得产生损耗峰的中心波长, n_{01}^{co} 和 n_{0m}^{cl} 分别代表纤芯模 LP_{01} 与包层模 LP_{0m} 的有效折射率, Λ 为光栅周期。利用传输矩阵法将均匀 LPG 划分, 每小段传输矩阵完全相等, 可定义为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} r & s \\ s & r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 r 和 s 分别表示均匀 LPG_j ($j=1,2$) 的纤芯模传输振幅和包层模传输振幅, 定义为:

$$r = \cos \sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2} \cdot L_j + \frac{i \cdot \delta_m \sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2} \cdot L_j}{\sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2}}, \quad (3)$$

$$s = \frac{i \cdot \kappa_m \sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2} \cdot L_j}{\sqrt{\kappa_m^2 + \delta_m^2}}, \quad (4)$$

κ_m 为纤芯模与包层模的耦合系数, 存在以下关系:

$$\kappa_m = \frac{\pi \Delta_n}{\lambda_m}, \quad (5)$$

Δ_n 为折射率调制深度, L_j 是第 j 段光栅的长度; i 是光栅划分的段数, 须满足: $i \ll \frac{L}{\Lambda}$ 。 δ_m 是自耦合系数, 定义为:

$$\delta_m = \frac{1}{2} \left(\beta_{01}^{co} - \beta_m^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad (6)$$

其中 β_{01}^{co} 和 β_m^{cl} 分别是纤芯模 LP_{01} 与包层模 LP_{0m} 的传播常量。

当将 LPG 级联, 第一个光栅耦合到包层的光若还未损耗完就遇到第二个光栅, 会被重新耦合回第二个光栅的纤芯, 与原本纤芯模中的光相遇, 因有光程差而产生内 Mach-Zehnder 干涉, 出现干涉峰[16]。它们的相位差为:

$$\Delta\phi = (n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl}) \cdot \left(\frac{L_1 + L_2}{2} + d \right), \quad (7)$$

两相邻干涉峰的波长间距为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta\phi} = \frac{\lambda^2}{(n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl}) \cdot \left(\frac{L_1 + L_2}{2} + d \right)}, \quad (8)$$

将光经过级联长周期光栅后的纤芯模振幅和包层模振幅由传输矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} r \\ s \end{bmatrix} = \mathbf{F}_2 \times \mathbf{F}_d \times \mathbf{F}_1 \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中 $\mathbf{F}_1$ 和 $\mathbf{F}_2$ 是 LPG1 和 LPG2 的传输矩阵。 $\mathbf{F}_d$ 是间隔光纤的传输矩阵, $\mathbf{F}_d$ [17]表示为:

$$\mathbf{F}_d = \begin{bmatrix} \exp \left[i \frac{\pi}{\lambda} (n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl}) d \right] & 0 \\ 0 & \exp \left(-\frac{i\phi}{\lambda} \right) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

则 $d=0, \varphi \neq 0$ 的相移 CLPG 的纤芯模传输振幅 r 和包层模传输振幅 s 表示为:

$$\begin{bmatrix} r \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 & s_2 \\ s_2 & r_2^* \end{bmatrix} F_d \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{i\varphi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-\frac{i\varphi}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & s_1 \\ s_1 & r_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 r_1^* 和 r_2^* 分别为两段长周期光栅基模传输振幅的共轭复数。平行传输率 T_{ph} :

$$T_{ph} = \left| \exp[i\varphi] (r_1 r_2 + s_1 s_2) \right|^2, \quad (12)$$

$d \neq 0, \varphi = 0$ 的无相移的级联长周期光栅的平行传输率 T_c :

$$T_c = |r|^2 = \left| \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda} (n_{01}^{co} - n_{0m}^{cl}) d\right] (r_1 r_2 + s_1 s_2) \right|^2, \quad (13)$$

3. 仿真结果与分析

仿真采用 Corning SMF-28 (康宁公司生产普通单模光纤) 结构参数进行模拟: 纤芯半径 $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.45$, 包层半径 $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$, 包层折射率 $n_2 = 1.445$, 外界折射率 $n_3 = 1$ [5]。对于均匀 LPG, 纤芯模只和具有轴对称场分布的一阶奇次包层模耦合, 且高次模更为敏感[18]。综合考虑选取一阶九次包层模来研究两 LPG 在级联时改变光栅周期 Λ 、长度 L 和折射率调制深度 Δn 对 CLPG 光谱的影响。

3.1. 周期对 CLPG 光谱特性的影响

改变两 LPG 的刻写周期, 图 1 给出了不同光栅刻写周期时 CLPG 的光谱特性。由图 1 可以看出随着光栅刻写周期的增加损耗峰向长波方向漂移, 在光栅周期 $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ 时得到了窄而深的最佳损耗峰。当周期 Λ 小于或大于 $500 \mu\text{m}$ 时, 损耗峰都发生了明显分裂。进一步对不同谐振波长与光栅周期变化关系进行了线性拟合(如图 2), 得到光栅周期变化与谐振波长漂移具有良好的线性关系。

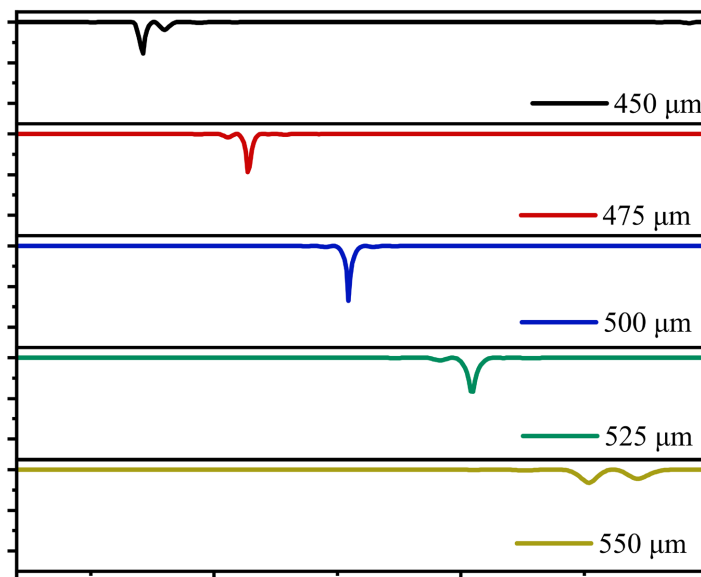


Figure 1. Changes the normal CLPG transmission spectrum of two LPG periods

图 1. 改变两 LPG 周期的正常 CLPG 透射谱

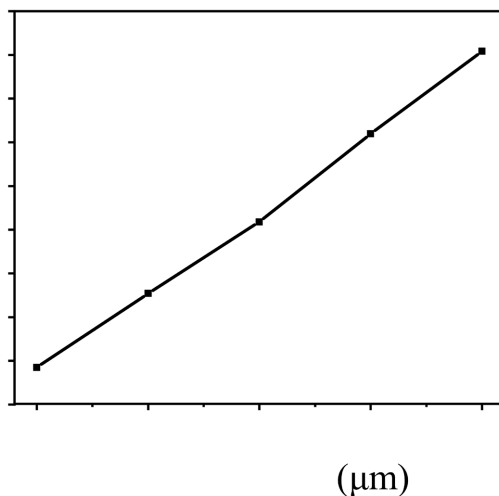


Figure 2. Relationship between CLPG period and wavelength

图 2. CLPG 周期与波长的关系

接着改变正常 CLPG 中 LPG1 的刻写周期,保持 LPG2 的周期 $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ 不变,LPG1 分别取 $490 \mu\text{m}$ 、 $495 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$ 、 $505 \mu\text{m}$ 。如图 3:

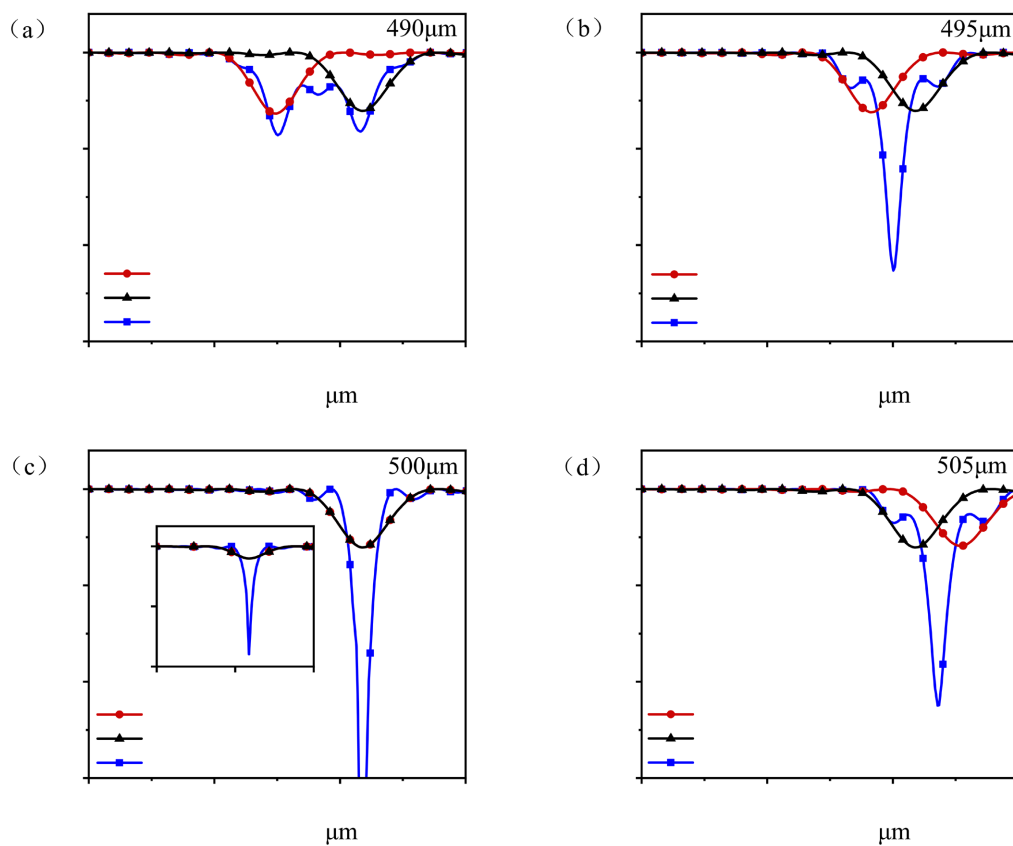


Figure 3. CLPG transmission spectrum with changing LPG2 period; (a) $490 \mu\text{m}$; (b) $495 \mu\text{m}$; (c) $500 \mu\text{m}$; (d) $505 \mu\text{m}$

图 3. 改变 LPG2 周期的 CLPG 透射谱; (a) $490 \mu\text{m}$; (b) $495 \mu\text{m}$; (c) $500 \mu\text{m}$; (d) $505 \mu\text{m}$

当 LPG1 周期变为 $490\text{ }\mu\text{m}$ 时 LPG1 与 LPG2 损耗峰发生重叠, 重叠处的波长会重新耦合到纤芯, 产生 Mach-Zehnder 干涉, 出现第三干涉峰。随着 LPG2 周期增大, 重叠的损耗峰增加, 第三干涉峰透射率也在增加。当两光栅相同时, 损耗峰完全重叠, 此时出现透射率最高, 带宽最窄的干涉峰。这是因为具有光程差的两个光发生干涉时, 他们的光程差是由光栅的周期决定的, 相同周期的光经过光栅因其恒定的相位差而产生最佳干涉峰。

进一步对周期与的波长偏移进行了线性拟合, 如图 4: 改变级联光栅中 LPG1 的周期与其引起的波长偏移同样具有良好线性关系, 且三个损耗峰向长波方向的偏移速度保持一致。

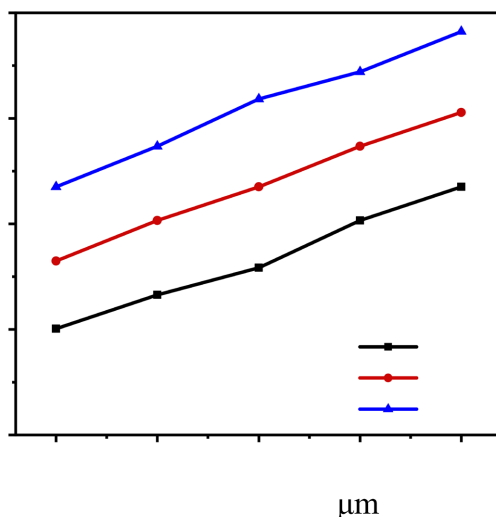


Figure 4. Relationship between CLPG wavelength and phase shift when LPG2 period is changed

图 4. 改变 LPG2 周期的 CLPG 波长与相移的关系

3.2. 长度对 CLPG 光谱特性的影响

使周期 $\Lambda = 500\text{ }\mu\text{m}$ 和其他参数不变。改变两个 LPG 光栅长度, 图 5 分别绘制了长度 L 为 2 cm 、 2.5 cm 、 3 cm 、 3.5 cm 时 CLPG 的透射谱。可以发现: 谐振峰波长无漂移, 两个 LPG 发生 Mach-Zehnder 干涉出现干涉峰。干涉峰随长度的增加峰值逐渐增大, 带宽逐渐减小。造成 CLPG 干涉峰透射率变化的主要原因是由于干涉发生时不同波长的模式的振幅不同。根据光的干涉原理, 干涉条纹的对比度可以表示为:

$$K = \frac{2A_{cl}/A_{co}}{1 + (A_{cl}/A_{co})^2}$$

在 CLPG 中, A_{cl} 和 A_{co} 分别表示在重新耦合发生时的包层模和纤芯模的振幅。当 A_{cl} 和 A_{co} 相等时, 有 $K = 1$, 此时干涉对比度最大。当长度 $L = 3\text{ cm}$ 时, 损耗峰值达到最大。此后, 长度进一步增加, 峰值减小。

进一步改变 CLPG 中 LPG1 的长度, 保持 LPG2 的长度不变, 选取两 LPG 长度比值分别为 $1:2$ 、 $1:1.5$ 、 $1:1$ 、 $1.5:1$ 、 $10:1$ 、 $100:1$ 这 6 种情况下长度改变对 CLPG 透射率的影响。从图 6 可以看出此时波长无明显漂移。当长度小于 3 cm 时, 随着 LPG1 的长度增大, 干涉峰透射率增大。当两 LPG 长度相同, 干涉峰损耗达到最大为 -26.9271 dB 。之后 LPG1 长度增大, 级联光栅的透射谱逐渐减小。比值为 $100:1$ 时, CLPG 透射谱减小到与单个 LPG2 的透射谱重合。

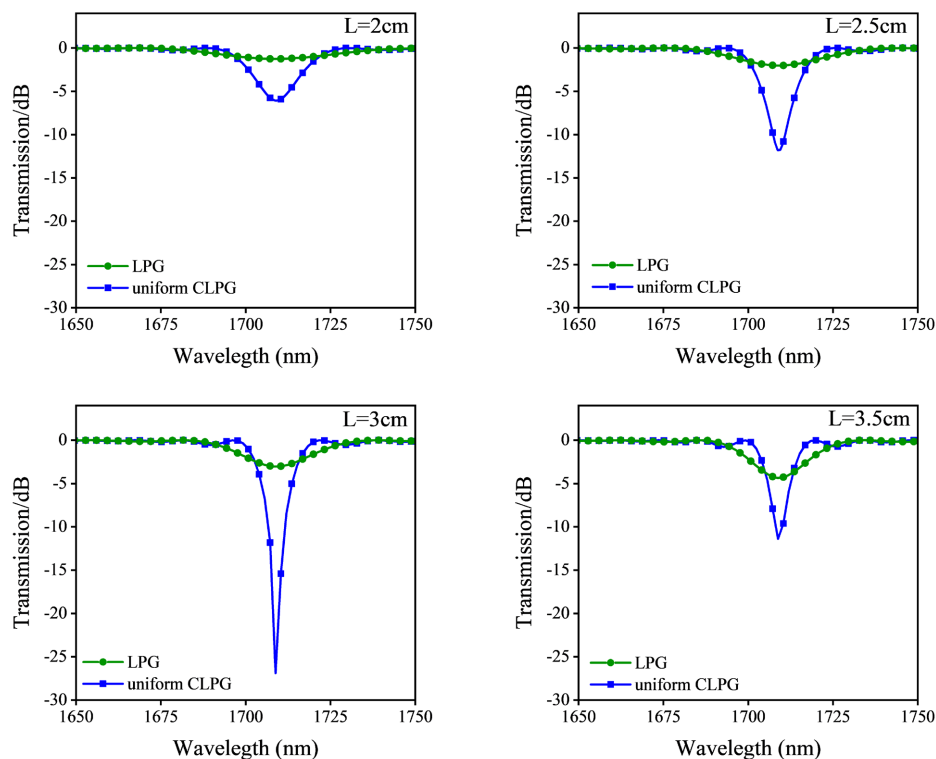


Figure 5. CLPG transmission spectrum with two LPG lengths changed

图 5. 改变两 LPG 长度的 CLPG 透射谱

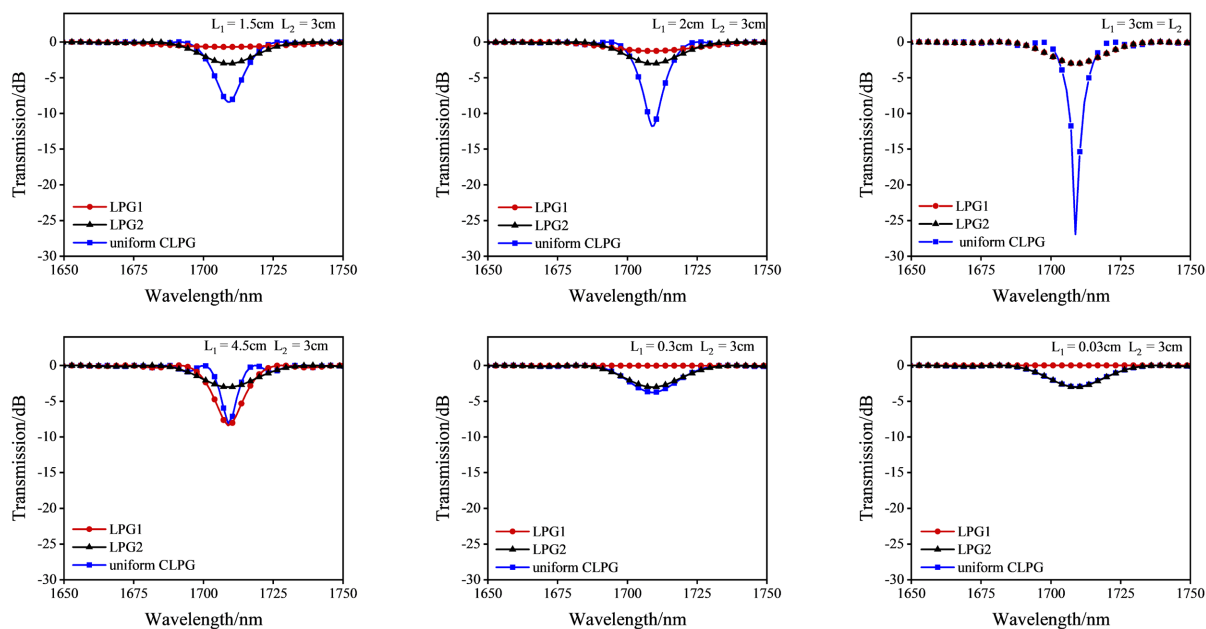


Figure 6. Depth CLPG transmission spectrum of changing LPG1 length

图 6. 改变 LPG1 长度的 CLPG 透射谱

3.3. 折射率调制深度对 CLPG 光谱特性的影响

保持周期 $\Lambda = 500 \mu\text{m}$, 长 $L = 3 \text{ cm}$, 其他参数不变。改变两 LPG 的折射率调制深度, 仿真过程中取

折射率调制深度分别为 0.00013~0.00017 (如图 7)。进一步改变级联长周期光栅中 LPG1 的调制深度, 保持 LPG2 的折射率调制深度不变(如图 8)。

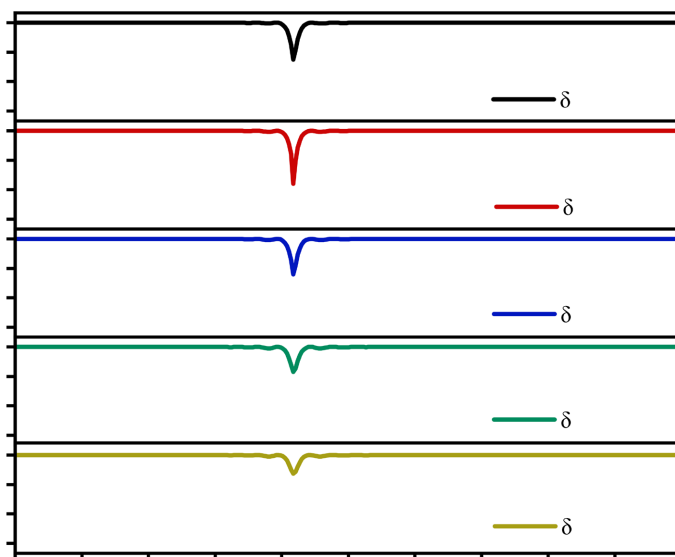


Figure 7. CLPG transmission spectrum with different refractive index depths of two LPG

图 7. 改变两 LPG 折射率调制深度的 CLPG 透射谱

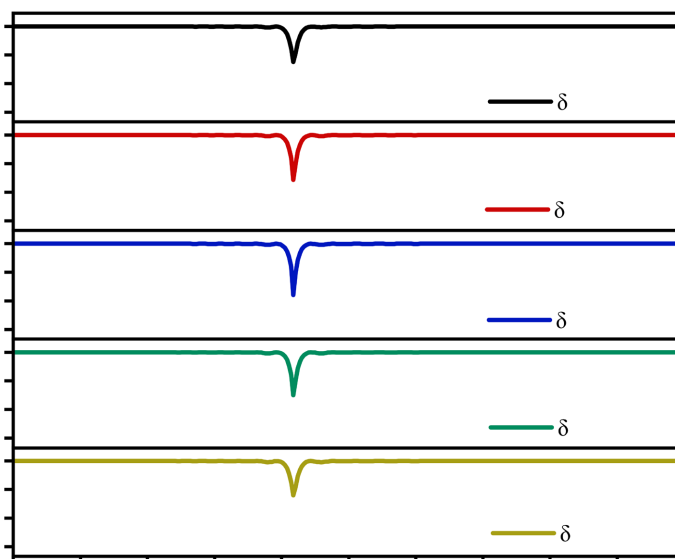


Figure 8. CLPG transmission spectra for changing the modulation depth of LPG1 refractive index

图 8. 改变 LPG1 折射率调制深度的 CLPG 透射谱

此时谐振峰波长无明显偏移, 随着折射率调制深度的增加, 损耗峰透射率增大。在 $\Delta_n = 0.00014$ 时达到最大, 纤芯模 LP_{01} 与包层模 LP_{09} 满耦合, 进一步增大调制深度, 光栅发生过耦合, 损耗峰将减小。

进一步改变级联长周期光栅中 LPG1 的调制深度, 保持 LPG2 的折射率调制深度不变(如图 9)。损耗峰仍保持先增大再减小的趋势, 当折射率调制深度都取 0.00014 时, 损耗峰损耗强度达到最大, 3 dB 带

宽达到最窄。将两种情况下 CLPG 的透射率横向对比(如图 9), 发现只改变 LPG1 折射率调制深度, 导致了损耗峰值变化速率降低, 削弱了折射率调制深度对 CLPG 折射率的影响。

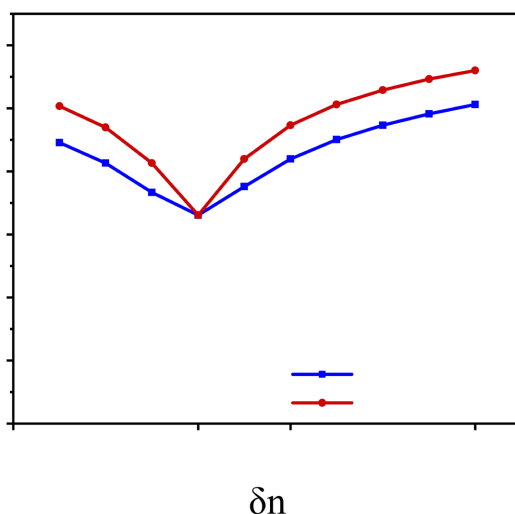


Figure 9. Relationship between CLPG transmittance and modulation depth

图 9. CLPG 透射率与调制深度的关系

4. 结论

对两个 LPG 级联而成的 CLPG 进行仿真分析, 分别分析周期 Λ , 光栅长度 L , 折射率调制深度 Δn 在 LPG1 和 LPG2 同时改变或只改变 LPG1 两种情况下, CLPG 透射谱变化规律。结果表明: 光栅的周期与损耗峰波长呈线性关系。光栅的长度和折射率调制深度决定了 CLPG 的耦合强度。当级联的两个 LPG 结构参数越接近, 损耗峰值透射率就越高, 各个参数对 CLPG 的调控就越有效。在进行 LPG 传感器设计时, 为保证获得更明显的光谱, 应首先选用两个参数相同的 LPG 级联。当两个级联 LPG 周期 $\Lambda = 500 \mu\text{m}$, 长度 $L = 3 \text{ cm}$, 折射率调制深度 $\Delta n = 0.00014$ 时, 得到了 CLPG 窄而深的高分辨率损耗峰。通过以上多种情况的分析, 为级联长周期光纤光栅在光通信和滤波器的实际应用中提供了很好的理论依据, 在工业生产中的温度[19]、浓度[20]、折射率[21]传感具有潜在应用。

参考文献

- [1] Vengsarkar, A.M. and Lemaire, P.J. (1996) Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters. *Journal of Lightwave Technology: A Joint IEEE/OSA Publication*, **14**, 58-65. <https://doi.org/10.1109/50.476137>
- [2] Ke, H. and Chiang, K.S. (1998) Analysis of Phase-Shifted Long-Period Fiber Gratings. *IEEE Photonics Technology Letters*, **10**, 1596-1598. <https://doi.org/10.1109/68.726761>
- [3] 陈儒. 长周期光纤光栅传输谱的 matlab 仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(4): 301-303+321.
- [4] 张奎华. 长周期光纤光栅传输谱特性研究[J]. 激光杂志, 2014, 35(9): 3638.
- [5] 朱雨雨, 郝亚茹, 张亚妮, 等. 长周期光纤光栅光谱特性仿真研究[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 451-458.
- [6] Duhem, O., Dascota, A. and Henninot, J.F. (1999) Long Period Copper Coated Grating as an Electrically Tunable Wavelength-Selective Filter. *Electronics Letters*, **35**, 1014-1016. <https://doi.org/10.1049/el:19990659>
- [7] Wang, Y.P., Rao, Y.J., Ran, Z.L., et al. (2003) A Novel Tunable Gain Equalizer Based on a Long-Period Fiber Grating Written by High-Frequency CO₂ Laser Pulses. *IEEE Photonics Technology Letters*, **15**, 251-253. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.806104>
- [8] Zhu, T., Rao, Y.J., Song, Y., et al. (2009) Highly Sensitive Temperature-Independent Strain Sensor Based on a

- Long-Period Fiber Grating with a CO₂-Laser Engraved Rotary Structure. *IEEE Photonics Technology Letters*, **21**, 543-545. <https://doi.org/10.1117/12.785788>
- [9] Wang, Q., Du, C., Zhang, J.M., *et al.* (2016) Sensitivity-Enhanced Temperature Sensor Based on PDMS-Coated Long Period Fiber Grating. *Optics Communications*, **377**, 89-93.
 - [10] Bai, Y.K., Zhang, Y. and Ma, X.R. (2015) A Novel Surrounding Refractive Index Sensor Based on the Polarization Characteristics of Thin-Cladding Long-Period Fiber Grating. *Optics Communications*, **355**, 607-611. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.07.004>
 - [11] Dianov, E.M., Vasiliev, S.A., Kurkov, A.S., *et al.* (1996) In-Fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on a Pair of Long-Period Gratings. *Proceedings of European Conference on Optical Communication IEEE*, **1**, 65-68.
 - [12] Zou, H.B., Liang, D.K. and Zeng, J. (2012) Dynamic Strain Measurement Using Two Wavelength-Matched Fiber Bragg Grating Sensors Interrogated by A Cascaded Long-Period Fiber Grating. *Optics & Lasers in Engineering*, **50**, 199-203. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.09.005>
 - [13] 匡娅祺, 周次明, 张文举. 级联长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(2): 43-47.
 - [14] 高敏, 葛海波, 李盼盼, 等. 不同长周期光栅的级联传输谱特性[J]. 光通信技术, 2018, 42(11): 56-59.
 - [15] 宋世德. 长周期光纤光栅的特性及传感应用研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2023: 6-21.
 - [16] Hu, X.L., Liang, D.K., Zeng, J., *et al.* (2011) A Study on a Long Period Fiber Grating Pair's Spectral Characteristics. *Physics Procedia*, **19**, 367-373. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.176>
 - [17] 王霞元, 黄勇林. 级联长周期光纤光栅的光谱特性研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 821-826.
 - [18] 张自嘉, 施文康, 高侃, 等. 长周期光纤光栅的谱结构研究[J]. 光子学报, 2004, 33(11): 1308-1312.
 - [19] Ding, J.F., Zhang, A.P. and Fu, H.Y. (2005) Experimental Characterization of the Spectra of Etched Long-Period Grating Pairs. *Passive Components and Fiber-Based Devices II*, **6019**, 60193H. <https://doi.org/10.1117/12.635985>
 - [20] Zhan, Y.G., Gu, K., Wu, H., *et al.* (2013) A Combined Long Period Fiber Grating Multi-Parameter Sensor. *Sensor Review*, **33**, 220-227. <https://doi.org/10.1108/02602281311324672>
 - [21] Kamikawachi, R.C., Possetti, G.R.C., Muller, M., *et al.* (2007) Influence of the Surrounding Refractive Index on the Thermal and Strain Sensitivities of a Cascaded Long Period Grating. *Measurement Science & Technology*, **18**, 3111. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/10/S10>