

引入调制结构形成的相移长周期光纤光栅研究

李晓兰 张伟刚 张珊珊 范弘建 殷丽梅

(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 通过在长周期光纤光栅的某一位置引入一段调制结构形成积累相移, 提出了一种新的相移长周期光纤光栅结构的设计方法。基于光纤光栅相位匹配原理, 给出了在引入的调制结构为均匀短周期光纤光栅, 其折射率调制深度与原光纤光栅一致时, 调制结构的参数(光栅周期和长度)与所引起相移大小的关系式, 并采用传输矩阵法和 CO₂ 激光单面曝光的方法从仿真和实验方面对所提出的结构进行了分析和验证。研究表明: 在长周期光纤光栅某点引入一段均匀短周期光栅调制结构能够形成相移长周期光纤光栅, 并且当其折射率调制深度与原长周期光纤光栅一致时, 形成的相移长周期光纤光栅光谱只与调制结构的长度有关。

关键词 相移长周期光纤光栅; 调制结构; 设计; 写制

中图分类号 TN929; TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0606006

Study of Phase-Shifted Long Period Grating Performed by Adding Modulated Structure

Li Xiaolan Zhang Weigang Zhang Shanshan Fan Hongjian Yin Limei

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

Abstract We propose a new method to design novel structure of phase-shifted long period grating by adding a modulated structure in a long period grating somewhere, which performs an accumulated phase shift. Based on the phase-match theory, the relation between the phase shift and parameters of the grating is derived, while the modulated structure is a uniform short grating and its modulated depth remains the same. This new theory is simulated with the transmission matrix method and the validity is proved by experimental fabrication with CO₂ laser. The study shows that adding a uniform short grating in a long period grating can form a phase-shift long period grating. And the spectrum only depends on the length of modulated structure, in the case that its modulated depth of refractive index is the same as the original one.

Key words phased-shifted long period fiber grating; modulated structure; designing; writing

OCIS codes 060.2340; 060.4080; 060.5060

1 引 言

近年来,长周期光纤光栅(LPG)因其特有的光谱特性,已被广泛应用于光纤通信和光纤传感领域^[1,2]。相移长周期光纤光栅(PSLPG)是在LPG上某一点或多个点引入相位改变,这会使LPG的透射谱中原有的峰从一个分裂为两个或多个峰。研究

表明,通过改变相移量、相移位置和相移点个数,可以控制PSLPG透射峰的位置及其大小。这些灵活的设计特性,使得PSLPG在增益平坦滤波器和多通道滤波等方面具有广泛的应用^[3,4]。

目前,相移光纤光栅的相移主要是通过两种途径实现:1)相位突变法,即在光栅上的一点或多点引

收稿日期: 2010-11-24; **收到修改稿日期**: 2011-02-18

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: 李晓兰(1986—),女,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: lxl6788@163.com

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

入空白未调制区域,产生相位突变;2)相移积累法,通过改变光栅某一段区域纤芯模和包层模的有效折射率差 Δn_{eff} ,产生积累相移,这可以通过对 LPG 局部腐蚀或升温等后处理的方式得以实现^[5,6]。在 PSLPG 设计与调制中,引入相移的方式和精确控制其大小,是影响光谱特性的关键因素。因此,探索新的相移引入方法对 PSLPG 的设计、调制以及应用具有重要意义。

本文提出一种在 LPG 某一位置引入一段短光栅调制结构,使该调制结构与原 LPG 的栅格周期产生差异,从而形成积累相移并形成 PSLPG。研究表明,引入调制结构形成的 PSLPG 光谱与调制结构参数有关。

2 理论分析与仿真

2.1 理论分析

图 1~3 分别为相位突变法、相移积累法和引入调制结构形成的 PSLPG 结构示意图。

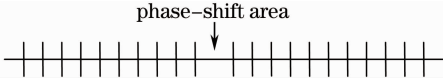


图 1 相位突变法产生相移示意图

Fig. 1 Schematic of the phase break induced phase-shift

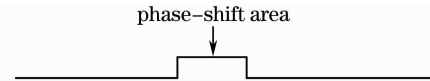


图 2 积累 Δn_{eff} 变化产生相移示意图

Fig. 2 Schematic of the accumulated Δn_{eff} change induced phase-shift

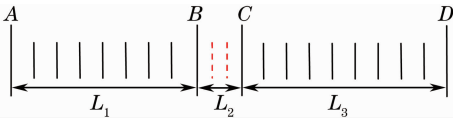


图 3 调制结构形成的 PSLPG 结构示意图

Fig. 3 Schematic of the sub-structure modulated PSLPG

图 3 中的 AD 段为 LPG, AB 段长为 L_1 , CD 段长为 L_3 ; 引入的调制结构段 BC 长为 L_2 。将 BC 段调制结构设置为一段均匀的短光栅,其折射率调制深度与 LPG 一致。并且,引入的短光栅须保证 BC 不会形成级联光栅。对比这 3 幅图可以看出,采用上述一些不同的方法,可以改变光栅中某一段的相移差。显然,当引入的调制结构周期与原 LPG 周期相同时,该光栅蜕变为常规均匀 LPG。

图 3 中, B、C 两点的相位差可表示为

$$\Phi_C - \Phi_B = \beta L_2, \quad (1)$$

式中 β 为 L_1, L_3 段光栅的传播常数。对于这种由调制结构形成的 PSLPG,其 BC 段的相移量为

$$\Delta\Phi_{CB} = \Phi_C - \Phi_B - \beta L_2. \quad (2)$$

当调制结构周期与原 LPG 周期不同时, B、C 两点的相位分别为

$$\Phi_B = \Phi_A + \beta L_1, \quad (3)$$

$$\Phi_C = \Phi_A + \beta L_1 + \beta' L_2, \quad (4)$$

式中 β' 为 L_2 段调制结构的传播常数。BC 段的相位差为

$$\Phi_C - \Phi_B = \beta' L_2. \quad (5)$$

于是,在 B、C 两点之间产生了一个积累相移,其大小为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{CB} &= \Phi_C - \Phi_B - \beta L_2 = L_2(\beta' - \beta) = \\ &L_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} - \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} \right) = 2\pi N \Delta_2 \frac{(\Delta_1 - \Delta_2)}{\Delta_1 \Delta_2} = \\ &2\pi(N - L_2/\Delta_1) = 2\pi N - 2\pi L_2/\Delta_1, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 n_{eff} 为纤芯的有效折射率, N 为调制结构区的栅格数。从(6)式可知,引入调制结构形成的光栅周期与原光栅不同,导致其在 B、C 两点形成了一个积累的相移,由此形成了相移光纤光栅,相移的大小取决于调制结构的长度。当 $N = 1$ 时,(6)式与常规 PSLPG 相移量计算公式相同^[3]。

2.2 光谱仿真

采用传输矩阵法对引入调制结构形成的 PSLPG 进行数值模拟和光谱分析。模拟采用的参数如下:原 LPG 栅格周期为 $\Delta_1 = 530 \mu\text{m}$, 长度 $L = 21.2 \text{mm}$, 折射率调制深度 $\Delta n_1 = 2 \times 10^{-5}$, 引入的短光栅调制结构长度不超过 3.5 mm。从 2.1 节的理论分析可知, PSLPG 光谱与引入的调制结构参数有关。

对 PSLPG 而言,若相移量的大小和位置是确定的,则引入的相移对光栅中所有谐振峰的影响是相同的。因此,为简明分析起见,可只考虑 2 个模式(纤芯模与某个包层模)之间的耦合^[7,8]。以纤芯模与 LP_{07} 模耦合产生的谐振峰作为代表进行光谱仿真分析。

2.2.1 调制结构位置对 PSLPG 光谱的影响

在光栅的不同位置引入相同调制结构,参数设置为 $N = 3$, $\Delta_2 = 618 \mu\text{m}$, 位置分别设置在 $L_1/L_3 = 1:1, 1:2, 1:3$ 处,仿真的 PSLPG 光谱如图 4(a)~(c)所示。图 4 表明,随着调制结构位置的变化, PSLPG 光谱中谐振峰分裂中心的损耗会发生变化,在光栅中心位置处达到最小,离光栅中心位置越远则分裂中心的损耗越大。这与常规 PSLPG 光谱随相移点位置变化的规律相同^[9]。

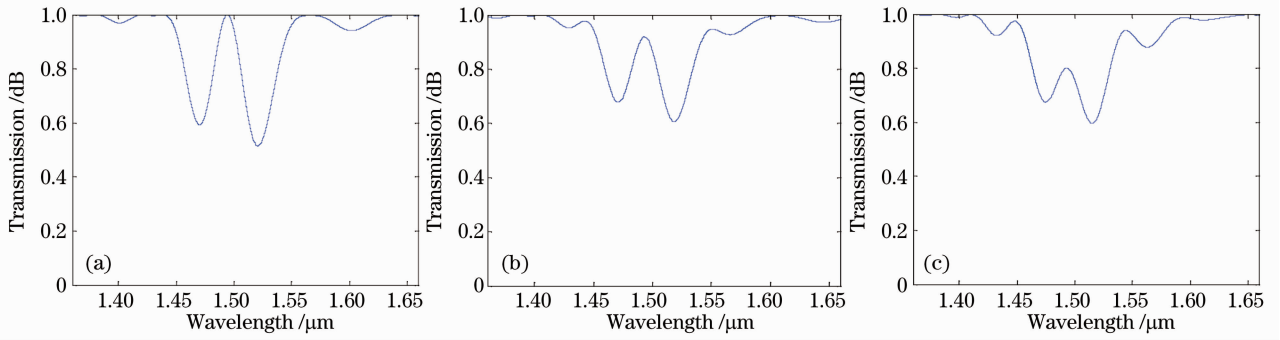

 图 4 在 $L_1/L_3=1:1, 1:2, 1:3$ 处引入 $N=3, \Lambda_2=618 \mu\text{m}$ 的调制结构的 LPG 光谱仿真图

 Fig. 4 Simulated spectra when adding modulated structures with $N=3, \Lambda_2=618 \mu\text{m}$ at $L_1/L_3=1:1, 1:2, 1:3$

2.2.2 调制结构长度对 PSLPG 光谱的影响

为简明并不失一般性,在光栅的中心位置引入不同长度的调制结构进行光谱仿真。具体参数分别设置为 $N=3, \Lambda_2=1103 \mu\text{m}, L_2=3309 \mu\text{m}; N=3,$

$\Lambda_2=1148 \mu\text{m}, L_2=3444 \mu\text{m}; N=3, \Lambda_2=1193 \mu\text{m}, L_2=3579 \mu\text{m}; N=3, \Lambda_2=1237 \mu\text{m}, L_2=3711 \mu\text{m}; N=4, \Lambda_2=861 \mu\text{m}, L_2=3444 \mu\text{m}$ 。仿真得到的 PSLPG 光谱如图 5(a)~(e) 所示。

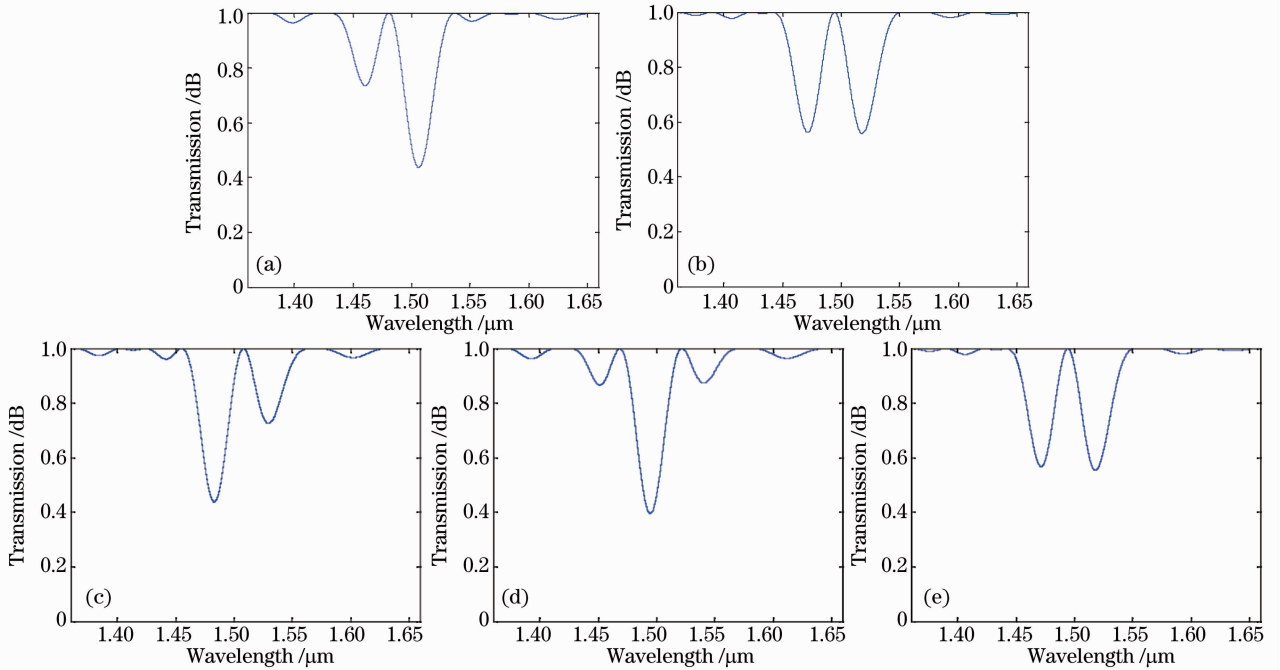


图 5 在光栅中心引入不同调制结构的 LPG 光谱仿真图

Fig. 5 Spectra of adding different modulated structures in the middle of LPG

从图 5(a)~(d) 中可以看出,随着调制结构长度的增加,每个谐振峰变为两个且发生红移,左侧的谐振峰深度逐渐增大,右侧的谐振峰深度则逐渐减小;当短光栅调制结构长度为原光栅周期的整数倍时,两个谐振峰变回一个谐振峰,其位置与原光栅的谐振峰位置一致。由(6)式计算得到的图 5(a)~(d) 对应的相移量分别为 $\Delta\Phi_{CB}=\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 。随着短光栅调制结构长度的增加,PSLPG 的相移量随之增加;而当调制结构的长度为原光栅周期的整数倍时,PSLPG 的相移量为 2π ,这与 PSLPG 随相

移量增加的变化规律相符^[9]。这说明,通过短光栅调制结构形成 PSLPG 的方法是可行的,相关的理论分析是有效的。

值得注意的是图 5(b) 和图 5(e) 具有相同的 PSLPG 传输光谱,但它们引入的短周期光栅调制结构长度相同而栅格周期及栅格数不同。这说明,在引入的均匀短光栅调制结构的折射率调制深度与原 LPG 一致的情况下,形成的 PSLPG 光谱只与调制结构的长度有关。

3 实验及分析

根据上述理论分析及光谱仿真,利用 CO_2 激光成栅系统,写制了几种具有代表性的引入调制结构形

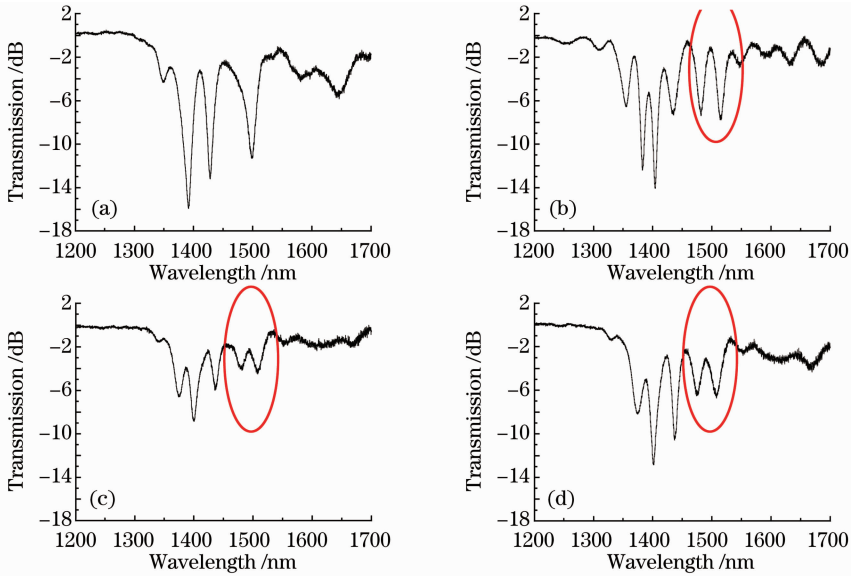


图 6 在 LPG 中心引入(a) $N=0$, (b) $N=1, \Lambda_2=795 \mu\text{m}$, (c) $N=2, \Lambda_2=663 \mu\text{m}$, (d) $N=5, \Lambda_2=583 \mu\text{m}$ 的调制结构的光谱测量图

Fig. 6 Measured spectra when adding modulated structure with (a) $N=0$, (b) $N=1, \Lambda_2=795 \mu\text{m}$, (c) $N=2, \Lambda_2=663 \mu\text{m}$, (d) $N=5, \Lambda_2=583 \mu\text{m}$ in the middle of LPG

图 6(a)为无调制结构的 LPG 光谱图,其中有 3 个谐振峰。图 6(b)为引入 $N=1, \Lambda_2=795 \mu\text{m}, L_2=795 \mu\text{m}$ 的调制结构 PSLPG 光谱图,这属于常规的 PSLPG。图 6(c)为引入 $N=2, \Lambda_2=663 \mu\text{m}, L_2=1326 \mu\text{m}$ 的调制结构 PSLPG 光谱图。图 6(d)为引入 $N=5, \Lambda_2=583 \mu\text{m}, L_2=2915 \mu\text{m}$ 的调制结构 PSLPG 光谱图。根据(6)式计算,图 6(b)~(d)的相移量大小均为 π 。根据仿真分析得到的 PSLPG 的特点,LPG 的光谱中的每个谐振峰都应该分裂为两个深度和带宽基本一致的谐振峰。从图 6(b)~(d)中谐振峰(椭圆标识区域)可以看出,引入短光栅调制结构使原 LPG 在 1500 nm 附近处的谐振峰分裂成预期的两个深度和带宽几乎一致的谐振峰,这与上述仿真的 PSLPG 光谱及其分析是相符的。这一实验表明,通过引入调制结构形成 PSLPG 的方法是可行的,相关的理论分析是有效的。至于在 1400 nm 处未出现预期的 4 个分裂谐振峰,其原因在于分裂形成的 4 个谐振峰中有 2 个发生了重叠,以致显现成 3 个大小不一的谐振峰。

4 结 论

提出了一种引入调制结构形成 PSLPG 的设计

成的 PSLPG。实验采用的光纤为 SMF28,相关参数分别为 $\Lambda_1=530 \mu\text{m}, L_1=L_3=10.6 \text{ mm}$ 。图 6 为引入短光栅调制结构前后写制的 PSLPG 光谱对比图。

与写制方法,并对其形成机理进行了理论分析、光谱仿真以及光栅写制实验验证。研究表明,引入均匀短光栅调制结构能够形成 PSLPG。在引入的均匀短光栅调制结构的折射率调制深度与原长周期光纤光栅一致的情况下,形成的 PSLPG 光谱只与调制结构的长度有关。通过引入新型调制结构(如非均匀短光栅等),有望形成具有新奇特性的相移光纤光栅。

参 考 文 献

- 1 S. Yin, K. W. Chung, X. Zhu. A highly sensitive long period grating based tunable filter using a unique double-cladding layer structure[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **188**(5-6): 301~305
- 2 A. D. Kersey, M. A. Daris, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 3 O. Deparis, R. Kiyan, O. Pottiez *et al.*. Bandpass filters based on π -shifted long-period fiber grating for actively mode-locked erbium fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(1): 1239~1241
- 4 Yinian Zhu, Ping Shum, Chao Lu *et al.*. EDFA gain flattening using phase-shifted long-period grating [J]. *Microwave Opt. Technol Lett.*, 2003, **37**(2): 153~157
- 5 Kun-Wook Chung, Shizhuo Yin. Designing of a phase-shifted long-period grating using the partial-etching technique [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2005, **45**(1): 18~21
- 6 L. R. Chen. Phase-shifted long-period grating by refractive index-shifting[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**(1): 187~191
- 7 He Jinlin, Sun Xiaohan, Zhang Mingde. The transmission spectra of phase-shifted LPG and its application in OADM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1106~1111

何瑾琳, 孙小函, 张明德. 相移长周期光纤光栅的光谱特性及其在光分插复用器中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(8): 1106~1111

8 Gu Zhengtian, Jiang Xiuli. Filter characteristics of phase-shifted long period fiber grating with film coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 633~637

顾铮□, 蒋秀丽. 镀膜相移长周期光纤光栅滤波特性[J]. 光学

学报, 2010, 30(3): 633~637

9 Liu Dong. Study of phase-shifted long period grating based on periodically induced pressure [D]. Chendu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. 25~35

刘东. 基于周期压力相移长周期光纤光栅研究[M]. 成都: 电子科技大学, 2010. 25~35

2011年“纪念《光学学报》创刊30周年特刊” 征 稿 启 事

创刊于1981年的《光学学报》是中国光学学会主办的第一本期刊。30年来,在历任主编王大珩院士、王之江院士、王润文研究员、徐至展院士和现任主编曹健林研究员的领导下,《光学学报》取得了一系列的成绩。2010年影响因子达到2.0,在国内物理类科技期刊中排名第一,连续7年荣获“百种中国杰出学术期刊”,被世界重要检索系统EI,CA, AJ和INSPEC等收录。《光学学报》始终致力于为我国光学科技人员与国内外同行进行学术交流、开展学术讨论以跟踪学科前沿和发展我国光学事业服务。《光学学报》刊登的论文集中反映了中国光学科技的新概念、新成果和新进展,其内容主要包括光纤光学与光通信、激光光学、信息光学、光学测量、光谱学、薄膜光学、量子光学、非线性光学、光学器件和材料等。为了纪念《光学学报》创刊30周年,编辑部计划在2011年9月正刊上出版“纪念《光学学报》创刊30周年特刊”,现特向国内外广大专家征集研究快报、研究论文和综述,以期集中反映我国近年来在光学及其相关领域取得的重大成就。

征稿范围:

光学及其相关领域。

稿件类型:

- 1、简要报道课题组最新研究成果的研究快报;
- 2、具有较高的创新性的原创研究论文;
- 3、国内外知名专家亲自撰写的综述文章。

特刊稿件截稿日期:2011年7月10日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(请在留言中标明“纪念《光学学报》创刊30周年特刊”投稿),详情请参见<http://www.opticsjournal.net>。本特刊投稿文体为中文,电子版请使用MS-word格式。有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: mayi@siom.ac.cn,电话:021-69918427-802。