

菲波纳契准周期超结构光纤光栅*

张健, 郑杰[†], 张玉书

(吉林大学 a. 集成光电子学 国家重点联合实验室吉林大学实验区; b. 电子科学与工程学院, 长春 130012)

摘 要:采用相位掩模板扫描法, 在单模光敏光纤中制备了中心波长为 1 541. 86 nm, 菲波纳契序数为 0~9 的准周期超结构光栅. 通过模拟引入相移过程中纤芯折射率的改变对制作参量进行了优化. 传输矩阵分析与实验结果均表明, 该超结构光纤光栅的透射谱呈现分形结构, 在中心波长附近有六循环和自相似特性. 所制备超结构光栅可作为 C 波段分形结构滤波器件在光通信和全光集成领域得到应用.

关键词:导波光学; 超结构布拉格光纤光栅; 相位掩模板; 菲波纳契序列; 传输矩阵

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2050-5

0 引言

介于周期晶体和无序晶体之间, 菲波纳契准周期结构具有和周期性光子晶体类似的“伪禁带”, 并在谐振波长附近有六循环和自相似特性^[1-2]. 由于其非周期性特点, 因此在设计方面比周期性光子晶体拥有更大的结构参量调节空间, 为多频光子带隙的研究提供了新的方法.

目前, 菲波纳契结构的研究仍局限于一维准周期复合介质多层膜的制备和特性表征. 所采用实验方法, 如电子束蒸发^[3-4]、等离子化学气相沉积法 (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition, PCVD)^[5] 及磁控溅射^[6] 等, 普遍存在折射率和膜厚难于控制、膜间应力不均匀导致裂化等问题, 难以实现高阶菲波纳契序数的准周期结构. 并且, 其谐振波长均在 700 nm^[3-4] 和 2 000 nm^[5] 附近, 远离 1. 55 μm 波段光通讯窗口.

本文将该结构应用于光纤, 设计、分析并制备了工作于 C 波段的菲波纳契准周期超结构光纤光栅. 分析与测量结果表明, 其透射光谱具有菲波纳契准周期结构特有的六循环特性和自相似特性. 与准周期多层介质膜相比, 所制备的光纤器件具有插入损耗低、结构灵巧、可重复制备和易于集成等优点, 可作为 C 波段分形结构多频带隙器件应用于全光集成电路领域.

1 光栅设计与理论推导

将一段未经紫外曝光的光纤段 (设为 A) 和一段均匀子光栅 (设为 B) 沿光纤轴向按菲波纳契序列排

列; $S_0 = B, S_1 = A, \dots, S_j = S_{j-1}S_{j-2} (j \geq 2)$, 即形成所设计的菲波纳契准周期超结构光纤光栅 (如图 1).

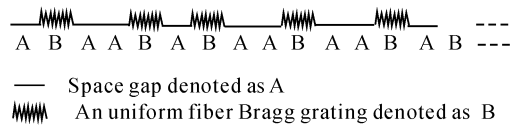


图 1 菲波纳契准周期超结构光纤光栅结构
Fig. 1 Schematic diagram of Fibonacci quasi periodic superstructure fiber bragg grating

图 1 中子光栅 (B) 和光纤段 (A) 的传输矩阵可分别写为^[7]

$$F_B = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L_1) - i \frac{\sigma}{\gamma} \sinh(\gamma L_1) & -i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L_1) \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L_1) & \cosh(\gamma L_1) + i \frac{\sigma}{\gamma} \sinh(\gamma L_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_A = \begin{bmatrix} \exp\left(-i \frac{\varphi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(i \frac{\varphi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 皆为幺模矩阵^[8-11], 式 (1) 中 $\hat{\sigma}$ 为“直流”自耦合系数, κ 为耦合系数中的“交流”分量, $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}$, L_1 为子光栅的长度. 在光栅谐振波长, 式 (1) 中 $\hat{\sigma} = 0$, 光栅的相移为 $\pi/2$. 式 (2) 中 $\varphi = 4\pi n_{\text{eff}} \cdot L_2/\lambda$ 为长度为 L_2 的光纤段的相移. 对于菲波纳契序数为 j 的准周期超结构光纤光栅 (S_j), 其传输矩阵可由式 (3) 给出

$$M_0 = F_B, M_1 = F_A, \dots, M_j = M_{j-1}M_{j-2} \quad (j \geq 2) \quad (3)$$

其透射率为

$$T = 1/|M_{11}|^2 \quad (4)$$

传输矩阵的迹 $x_j = \text{Tr}(M_j)/2$ 满足递推公式

$$\begin{aligned} x_0 &= \cosh(\gamma L_1), x_1 = \cos \frac{\varphi}{2}, \\ x_2 &= \cosh(\gamma L_1) \cos \frac{\varphi}{2} - \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sinh(\gamma L_1) \sin \frac{\varphi}{2}, \end{aligned}$$

* 国家自然科学基金 (60577008、60777038) 资助
[†] Tel: 0431-85168240-8121 Email: zhengjie@jlu.edu.cn
收稿日期: 2008-09-10 修回日期: 2008-09-27

$$\dots, x_j = 2x_{j-1}x_{j-2} - x_{j-3} \quad (j \geq 3) \quad (5)$$

采用与菲波纳契介质多层膜结构相同的分析方法,将传输矩阵的迹视为动力学图谱,则可推导出常量

$$I = x_j^2 + x_{j-1}^2 + x_{j-2}^2 - 2x_jx_{j-1}x_{j-2} - 1 = \frac{k^2}{\gamma^2} \sinh^2(\gamma L_1) \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

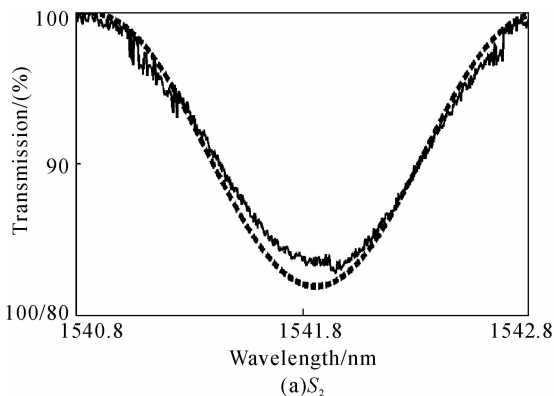
该常量即代表准周期特性的强弱程度.当 $\varphi=0$ 时, $I=0$,由 φ 表达式可得出 $L_2=0$,图1变为均匀周期布拉格光栅,结构的准周期特性消失.当 $\varphi=\pi, \kappa=\gamma$ 时, I 为极大值,此时对应光栅中心波长,由式(1)~(4)可推出 $S_j \sim S_{j+6}$ 准周期超结构光纤光栅的透射率为

$$\begin{array}{ccccc} (S_{j+6}/S_j) & & (S_{j+1}) & & (S_{j+2}) \\ T_f & \longrightarrow & T_f & \longrightarrow & T_f \\ \uparrow & & & & \downarrow \\ T_f & \longleftarrow & T_f & \longleftarrow & T_f^2/(2-T_f)^2 \\ (S_{j+5}) & & (S_{j+4}) & & (S_{j+3}) \end{array} \quad (7)$$

式中 $T_f = 1/\cosh^2(\kappa L_1)$,为单个子光栅的透射率.由式(7)可看出其中心波长透射率具有六循环特性,因此准周期效应最为明显.研究表明^[1],满足上述特性的准周期光子晶体,其 j 阶与 $j+6$ 阶菲波纳契结构的透射谱形状在谐振波长附近相似,但波长范围相差一个缩放因子.

2 超结构光纤光栅制备

本文应用相位掩模板扫描法^[12-14]在单模光敏光纤中制备了的菲波纳契准周期超结构光纤光栅.所采用的紫外光源为248 nm准分子激光器,经透镜聚焦后光束直径为1 mm,在步进电机的带动下以0.1 mm/s的速度沿光纤扫描.周期和长度分别为 $\Lambda=1\,058.04$ nm和 $L=25$ mm的相位掩模板固定在精度为1 nm的压电驱动平台(Piezoelectric Transducer, PZT)上.子光栅的长度和中心波长分别为1 mm和1 541.86 nm.通过测量该条件下写入的2 cm均匀光栅的谐振峰值漂移,可确定紫外诱导折射率改变量为 $\Delta n_{\text{eff}} = 3 \times 10^{-4}$.实验中,通过程序控制步进电机和PZT的位移,在图1中A单元的位置引入 π 相移,制作了从 S_0 (只包含1个子光栅)



到 S_9 (包含21个子光栅和34个 π 相移,总长度21 mm)的准周期超结构光纤光栅.

实验中相位掩模板扫描法引入 π 相移的具体过程为:步骤1,步进电机带动激光光束沿光纤轴向匀速扫描;步骤2,当扫描1 mm时,在纤芯中写入一个子光栅;步骤3, PZT带动相位掩模板相对光纤移动 $\Lambda/4=264.51$ nm,由于掩模板在光纤上的衍射条纹周期为 $\Lambda/2$,因此上述位移所产生新的衍射条纹与原光栅强弱刚好相反,当激光扫描另一个子光栅长度,即可在两个子光栅之间引入大小为 π 的相移.为优化参量,实验中对相移过程中的纤芯折射率变化进行了模拟并绘于图2.结果表明,制作过程中的误差主要来源于:1)相位掩模板扫描法引起的纤芯平均有效折射率改变使光栅产生了啁啾.2) π 相移位置比设计值向左偏移1/2光栅长度.3) π 相移附近的折射率缓变导致其相移量略大于 π 值.针对2)、3)两点,在实际写入过程中,第一段光栅的长度被重设为1.5 mm.经反复实验比较,相位掩模板位移量的最优值为214.51 nm,比理论值(261.51 nm)减少50 nm.

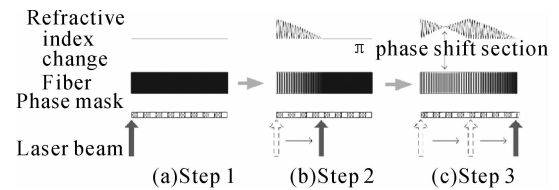
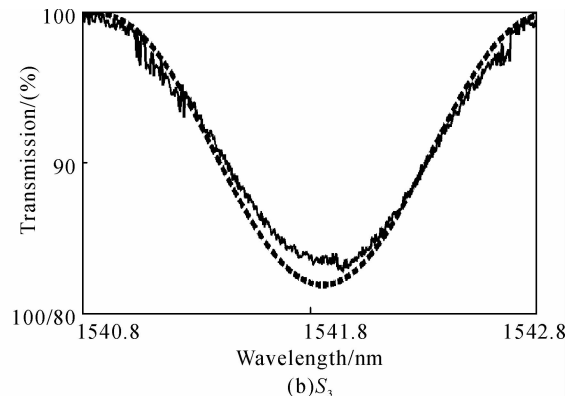


图2 制备过程中纤芯有效折射率变化模拟

Fig. 2 Simulation of the effective refractive index change during the fabrication procedure

3 结果与讨论

所制备的 $S_2 \sim S_9$ 准周期超结构光纤光栅透射谱,以及采用传输矩阵法数值模拟的结果如图3.由图3可见,随着菲波纳契序数增加,以谐振波长 $\lambda_0 = 1\,541.86$ nm为中心对称出现越来越多的谐振峰,器件透射谱呈现分形结构,其光谱的形状和谐振峰的位置与理论模拟符合基本完好,结果优于实验报道的菲波纳契介质多层膜^[3-4].由图3可见,低阶斐



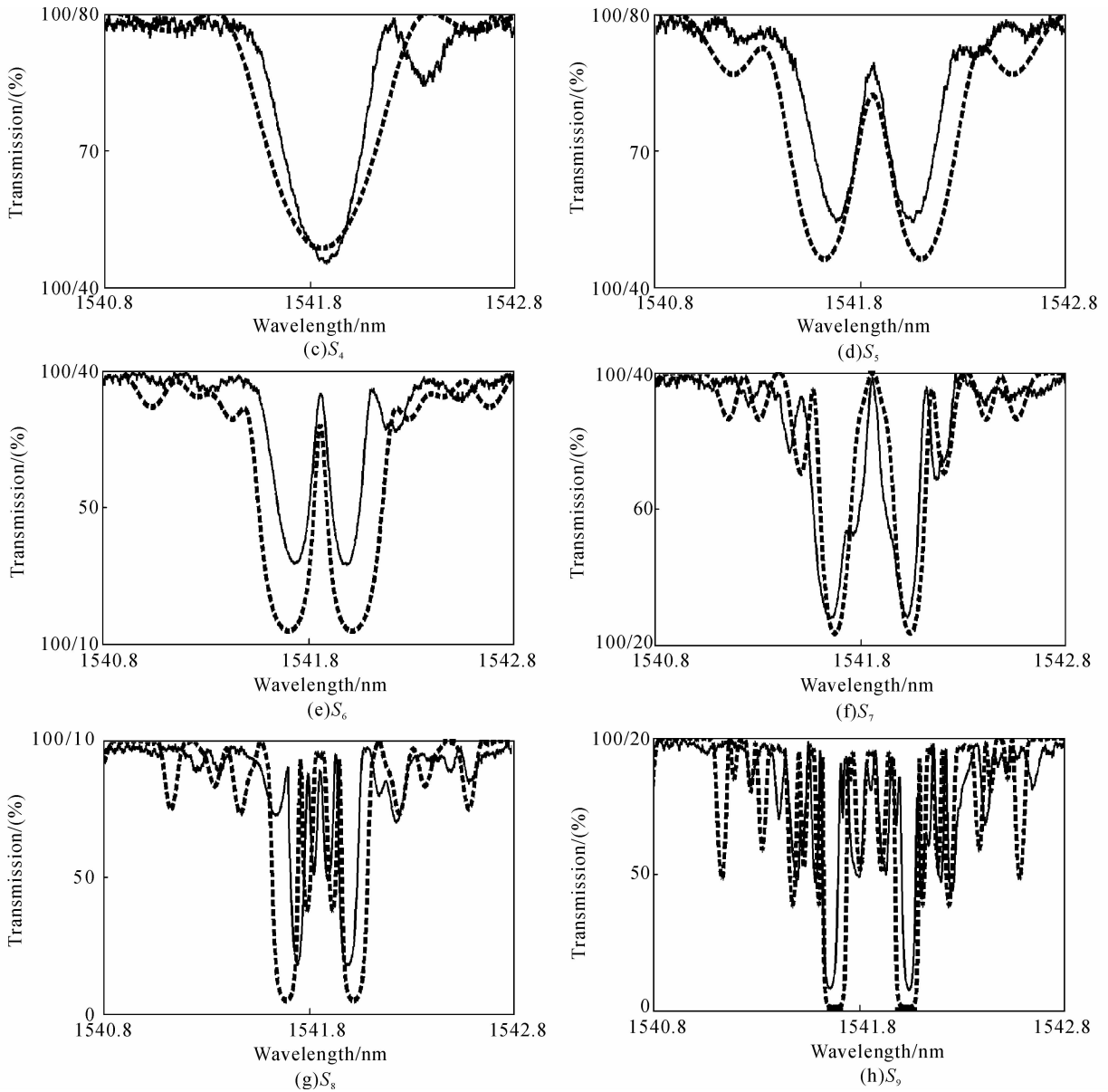
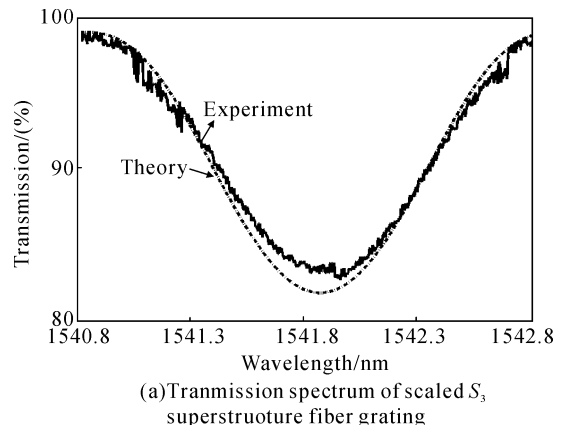


图 3 $S_2 \sim S_9$ 菲波纳契准周期超结构光纤光栅透射谱
 Fig. 3 Transmission spectra of $S_2 \sim S_9$ Fibonacci quasi-periodic super structure fiber gratings

波那契光栅(如 S_4)透射谱的长波方向存在杂峰,造成光谱相对于中心波长的不对称.随着斐波那契序数的增高,光栅结构更加复杂,高阶光栅(如 S_8, S_9)透射峰的位置与大小较理论值出现较大的偏差.经分析,认为与该误差有关的因素为:1)激光光斑能量分布不均匀,导致光栅轴向折射率改变与理论预期不一致;2)步进电机与 PZT 的精度误差引起光栅长度和相移的偏差;3)紫外侧向写入法使纤芯横截面折射率非均匀变化,产生一定的双折射效应.

通过分析比较图 4 中各超结构光纤光栅在中心波长的透射率,可看出 $S_j - S_{j+6}$ 超结构光栅在谐振波长的透射率变化规律与式(7)相同,其中 S_j 与 S_{j+6} 的中心波长透射率近似相等,验证了其六循环特性.

为研究所制备准周期超结构光栅的自相似特性,将 S_3 与 S_9 超结构光栅的透射谱绘于图 4.其中 S_9 的波长范围缩小了 30 倍.可观察到 S_3 与 S_9 在中心波长附近光谱形状的相似.由于准周期结构的



(a)Transmission spectrum of scaled S_3 superstructure fiber grating

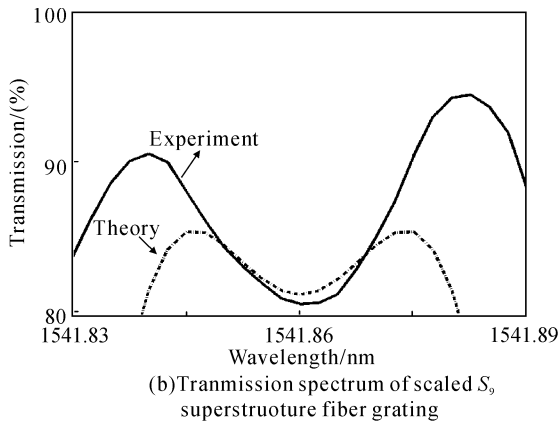


图 4 S_3 与波长范围缩小的 S_9 准周期超结构光纤光栅透射谱

Fig. 4 Comparison of the transmission spectrum of S_3 with the scaled spectrum of S_9

自相似特性只在谐振波长有效,因此图 4 中随着波长偏离 1 541.86 nm, S_3 与 S_9 透射谱形状的偏差亦逐渐增大。

4 结论

本文设计、分析并制作了菲波纳契准周期超结构光纤光栅。理论与实验结果均表明,器件的透射谱具有分形结构,以及六循环和自相似等准周期光子晶体特有的光学特性。通过相位掩模板扫描法,可实现对相移光纤段长度纳米量级的精确控制,器件制备有较高可重复性。显然,采用长相位掩模板即可实现更高菲波纳契序列的准周期超结构光栅。制作的全光纤准周期器件为菲波纳契光子晶体特性的研究提供了新的技术手段。该器件还可作为 C 波段分形光谱滤波器在光通信和光集成领域得到广泛应用。

参考文献

- [1] KOHMOTO M, SUTHERLAND B, IGUCHI K. Localization in optics: quasiperiodic media[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2436-2438.
- [2] TANG Bing-shu. Study on the transmission properties of Fibonacci one-dimensional photonic crystal nanometer films in visible region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1426-1430.
汤炳书. 光学波段菲波纳契序列一维光子晶体纳米膜传输特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1426-1430.
- [3] GELLERMANN W, KOHMOTO M, SUTHERLAND B, *et al.* Localization of light waves in Fibonacci dielectric multilayers[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, **72**(5): 633-636.
- [4] PENG R W, MAZZER M, HUANG X Q, *et al.* Symmetry-induced perfect transmission of light waves in quasiperiodic dielectric multilayers[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **80**: 3063-

- 3065.
- [5] NEGRO L D, OTON C J, GABURRO Z, *et al.* Light transport through the band-edge states of Fibonacci quasicrystals[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**(5): 055501.
- [6] NEGRO L D. Photon band gap properties and omnidirectional reflectance in Si/SiO₂ Thue-Morse quasicrystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(25): 5186-5188.
- [7] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(8): 1277-1294.
- [8] HUANG Yong-qing, LIU Nian-hua. Propagation of a pulse through one-dimensional photonic crystals containing negative materials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1211-1214.
黄永清, 刘念华. 光脉冲在一维负折射材料光子晶体中的传播[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1211-1214.
- [9] ZHANG Zi-jia, WANG Chang-ming. Investigation of the transfer matrix of the fiber gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1073-1077.
张自嘉, 王昌明. 光纤光栅传输矩阵研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1073-1077.
- [10] SHANG Ting-yi, ZHENG Yi, ZHANG Hui-yun, *et al.* Omnidirectional gap and defect mode of one dimensional photonic crystals with negative index materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 663-666.
尚廷义, 郑义, 张会云, 等. 含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 663-666.
- [11] ZHOU Zhi, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* A Fast simulation method for sampled fiber bragg gratings with periodic index distribution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2266-2269.
周志, 潘炜, 罗斌, 等. 折射率周期分布取样光纤 Bragg 光栅的快速分析方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2266-2269.
- [12] COLE M J, LOH W H, LAMING R I, *et al.* Moving fibre/phase mask-scanning technique for enhanced flexibility in producing fibre gratings with uniform phase mask[J]. *Electro Lett*, 1995, **31**(11): 1488-1490.
- [13] WANG Li, CHANG Li-ping, CHEN Jia-li, *et al.* A fiber grating etching method with small tunable range of grating wavelength employing phase mask [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 452-455.
王利, 常丽萍, 陈嘉琳, 等. 一种利用相位掩模板对光栅波长进行微调的光栅刻写方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 452-455.
- [14] XU Xin-hua, WANG Qing. Theoretical analysis of linearly chirped Moiré fiber gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1618-1623.
徐新华, 王青. 线性啁啾莫尔光纤光栅的理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1618-1623.

Fibonacci Quasi-periodic Superstructure Fiber Bragg Gratings

ZHANG Jian, ZHENG Jie, ZHANG Yu-shu

(a. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics; b. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Quasi-periodic superstructure fiber Bragg gratings (SFBG) of 0~9 Fibonacci order with the central wavelength 1 541. 86 nm were written into single mode photo-sensitive fiber by phase-mask scanning technique. The fabrication parameters were optimized by simulating the UV induced refractive index change in the fiber core. Both theoretical and experimental results show that the transmission spectra were multi-fractal, self-similar and the transmission coefficients have six-cycle property. The fabricated SFBG can be served as C-band multi-frequency optical device in optical integrated circuits and optical communication system.

Key words: Guided wave optics; Superstructure fiber Bragg grating; Phase mask; Fibonacci sequence; Transfer matrix



ZHANG Jian is an associated professor at Jilin University. His main research interests focus on optical fiber gratings and their applications.