

光子晶体光纤重叠光栅理论模型与光谱特性研究

江鹏 毕卫红 齐跃峰 付兴虎 武洋 田朋飞

Theoretical model and spectrum characteristics of superimposed photonic crystal fiber grating

Jiang Peng Bi Wei-Hong Qi Yue-Feng Fu Xing-Hu Wu Yang Tian Peng-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

TE₀ 导模干涉刻写周期可调亚波长光栅理论研究

Theoretical investigation of adjustable period sub-wavelength grating inscribed by TE waveguide modes interference lithography

物理学报.2016, 65(9): 094206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094206>

全介质光栅在太赫兹波段的光调控特性

Optical modulation characteristics of all-dielectric grating at terahertz frequencies

物理学报.2016, 65(7): 074209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074209>

畴腐蚀掺镁铌酸锂可调阵列光分束器的研究

Tunable array beam splitter with different domain-etching depth based on MgO-doped lithium niobate crystal

物理学报.2016, 65(1): 014215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014215>

基于光纤叠栅的全光纤声光可调谐滤波器的特性分析

Analysis of all fiber acousto-optic tunable filter based on superimposed fiber Bragg gratings

物理学报.2015, 64(17): 174207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174207>

双层金属纳米光栅的 TE 偏振光异常透射特性

Extraordinary optical transmission through bilayer metallic nano-grating for s-polarization light

物理学报.2015, 64(16): 164206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164206>

光子晶体光纤重叠光栅理论模型与光谱特性研究*

江鹏¹⁾ 毕卫红^{1)2)†} 齐跃峰¹⁾²⁾ 付兴虎¹⁾²⁾ 武洋¹⁾ 田朋飞¹⁾

1)(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

2)(河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2016年5月3日收到; 2016年8月1日收到修改稿)

本文对光子晶体光纤重叠光栅的传输光谱及特性进行了研究. 在理论上, 提出了基于 $V-I$ 传输矩阵法的光子晶体光纤重叠光栅分析模型, 仿真研究了布拉格叠栅和啁啾叠栅的反射谱和时延特性. 在实验上, 利用 193 nm 紫外激光在光敏单模光子晶体光纤中实验制备了定制波长间隔的四重布拉格重叠光栅和波长间隔 0.82 nm 的啁啾重叠光栅. 研究结果显示布拉格光栅的重叠光栅可通过各子光栅写制参数实现光谱灵活定制; 基于啁啾光栅的重叠光栅具有周期性宽带滤波特性, 谐振周期可由光栅周期偏移调整, 且具有平坦的幅度响应和呈良好线性的群时延. 实验所得光栅光谱与理论分析很好地符合. 研究结果为光子晶体光纤重叠光栅的设计、制备及应用提供了重要的参考依据.

关键词: 光子晶体光纤, 光子晶体光纤叠栅, $V-I$ 传输矩阵, 光谱特性

PACS: 42.79.Dj, 42.81.Wg, 42.81.-I

DOI: 10.7498/aps.65.204208

1 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 具有灵活的空气孔结构, 可以实现普通光纤难以实现的高非线性、宽单模传输特性、模场分布可控等特性^[1-3], 这为研制各种新颖的光学器件^[4-6] 提供了新的途径.

重叠光栅是通过在同一光纤区域重复写入多个光栅形成的光栅器件, 人们对基于普通光纤的重叠光栅已开展了研究, 并发现其许多独特的光学特性: 同型光栅的重叠通过集成不同参数的光栅, 可实现光栅应用的拓展, 如布拉格重叠光栅可应用于多波长滤波^[7], 长周期重叠光栅可实现光模场整形^[8], 啁啾重叠光栅在间隔可调谐多波长滤波、超快脉冲的产生、多通道色散补偿等^[9-11] 方面具有明显的优势; 不同光栅的重叠兼有了多种光栅的光学特性, 在光器件功能集成、光纤模式再耦合^[12,13]

方面具有很大的应用潜力.

基于 PCF 的重叠光栅将两者各自优势相结合, 在高速率 DWDM 通信、大功率多波长光纤激光器、多参量纤上痕量传感等方面有着很大的应用潜力.

本文通过 $V-I$ 传输矩阵法建立理论模型, 对单模传输的 PCF 布拉格叠栅和啁啾叠栅的反射光谱及时延特性进行了仿真研究, 利用 193 nm 紫外激光在掺锗的光敏 PCF 通过相位掩模板法实现高反射率的重叠光栅写入, 理论分析结果和实验结果一致.

2 PCF 重叠光栅理论模型

2.1 基于 $V-I$ 传输矩阵法的叠栅模型

PCF 的纤芯写入 Bragg 光栅后, 光栅谐振发生在正向传导的纤芯模与反向传导的纤芯模和包层模之间. 对单模传输的 PCF, 除了正向基模与反向基模的耦合, 其余耦合能量均通过高阶包层模泄

* 国家自然科学基金 (批准号: 61475133, 61275093, 61575170)、河北省自然科学基金 (批准号: F2015203277, F2016203389, F2016203392) 和河北省应用基础研究计划重点基础研究项目 (批准号: 16961701D) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: whbi@ysu.edu.cn

露, 在纤芯无反射峰形成. 为得到较好的叠栅光谱, 我们选用单模传输的PCF, 故在此对光纤前向基模与反向基模的耦合的光谱特性进行分析.

普通光栅的分析方法主要有耦合模理论、传输矩阵法、多层膜法等, 耦合模理论^[14]作为严格的理论分析方法, 计算结果精确, 但对于重叠光栅, 仅能分析两重叠栅的情况, 且要求各子光栅的折变强度和切趾相同; 传输矩阵和多层膜法^[15]虽然可以分析结构较复杂的光栅, 但是分析过程费时过长, 在分析重叠数较多的叠栅上显得尤为明显. Capmany等^[16]和 Garcia-Munoz等^[17]基于多层膜方法提出了V-I传输矩阵法, 该方法用于计算结构复杂的光纤光栅时可以大幅度缩短计算时间, 极大提高运算速率. 本文利用V-I传输矩阵法建立叠栅分析模型.

V-I传输矩阵法基于多层膜法, 将光栅看成由多层薄膜构成, 每层薄膜内传输的光场可用边界矩阵和传输矩阵的乘积来表示, 将各层矩阵连乘, 得到光纤光栅最终的V-I矩阵.

叠栅是在一段光纤区域内重叠地写入多个布拉格光栅形成, 其折射率分布可表示为

$$n(z) = n_{av}(z) + \sum_{i=1}^N \Delta n_i A_i(z) \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_i} z + \phi_i \right], \quad 0 \leq z \leq L, \quad (1)$$

其中N为叠栅子光栅的重数(光栅重叠数), $n_{av}(z)$ 为平均折射率, z 和 L 为光栅的轴向坐标和总长度, Δn_i , $A_i(z)$, Λ_i 和 ϕ_i 分别为第*i*个子光栅的最大折射率调制量、切趾函数、周期和初始相位. 我们将折射率调制的周期余弦函数用相同周期的矩形函数近似替代, 如图1所示, 并将叠加后的折射率中每一个矩形条作为一个薄膜层矩阵元, 建立重叠光栅V-I矩阵模型.

由V-I矩阵理论可知, 第*m*层的界面矩阵可表示为^[16]

$$V I_{mt} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

第*m*层的传输矩阵表示为

$$V I_{mp} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_m & j Z_m \sin \varphi_m \\ j \frac{\sin \varphi_m}{Z_m} & \cos \varphi_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, j 为虚数单位, $\varphi_m = (2\pi n_m / \lambda) L_m$, $Z_m = 120\pi / n_m$, 其中 λ 为传输光的波长, n_m , L_m 分别为

第*m*层膜层的折射率和长度. 对于整个光栅区域, V-I传输总矩阵为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = V I_{0p} V I_{1p} \cdots V I_{(N-1)p} \begin{bmatrix} V_N \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V I_{11} & V I_{12} \\ V I_{21} & V I_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_N \\ I_N \end{bmatrix}. \quad (4)$$

V-I传输矩阵法计算叠栅透射和反射系数的表达式为:

$$t = \frac{2}{V I_{11} + V I_{12} / Z_2 + V I_{21} Z_1 + V I_{22} Z_1 / Z_2}, \quad (5)$$

$$r = \frac{V I_{11} + V I_{12} / Z_2 - V I_{21} Z_1 - V I_{22} Z_1 / Z_2}{V I_{11} + V I_{12} / Z_2 + V I_{21} Z_1 + V I_{22} Z_1 / Z_2}. \quad (6)$$

叠栅的时延为

$$\tau(\lambda) = \frac{d\theta}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda}, \quad (7)$$

式中 θ 为反射系数*r*的相位.

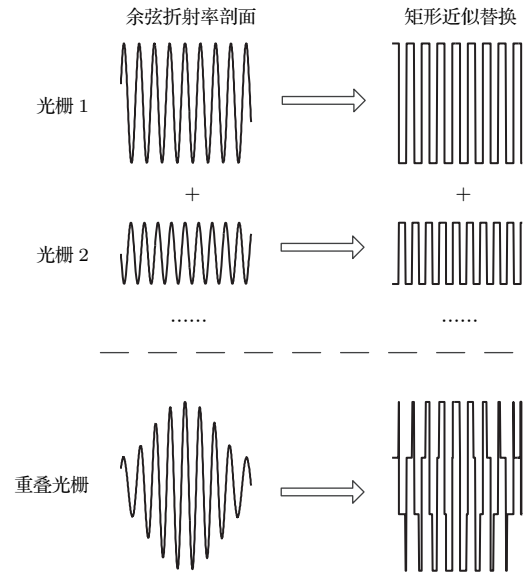


图1 重叠光栅折射率剖面近似替代示意图
Fig. 1. Approximate replacement process of superimposed grating refractive index profile.

2.2 叠栅光谱及时延特性仿真分析

首先, 通过叠栅V-I传输矩阵模型对布拉格叠栅进行仿真, 选取光栅参数如下: 光栅栅长 $L = 20$ mm, 最大光栅周期 $\Lambda_0 = 538.87$ nm, 叠栅周期间隔分别取0.3, 0.4和0.5 nm, 有效折射率 $n_{eff} = 1.439$, 调制折变量 $\delta n = 1 \times 10^{-5}$. 得到四重布拉格叠栅光谱及群时延结果如图2所示, 四反射峰反射率一

致, 波长间隔由小到大分别为0.86 nm, 1.15 nm和1.44 nm.

周期有偏移的啁啾光栅重叠可以产生法布里-珀罗干涉, 从而可形成周期性的宽带滤波特性, 我们对有周期偏移的二重啁啾叠栅也进行了仿真研究, 选取光栅参数如下: 光栅栅长 $L = 20$ mm, 二重啁啾光栅中心周期为别为 $\Lambda_1 = 538.870$ nm,

$\Lambda_2 = 538.754$ nm, 中心周期差 $\Delta\Lambda = 0.116$ nm, 周期啁啾系数 C 均为 0.556 nm/cm, 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.439$, 调制折变量 $\delta n = 2.5 \times 10^{-5}$. 得到二重啁啾叠栅光谱及时延结果如图3所示, 啁啾叠栅谐振波长间隔0.81 nm. 由仿真结果可以看到, 在干涉区域内各反射峰幅度一致, 群时延除了各反射峰两端的突变, 呈良好线性变化.

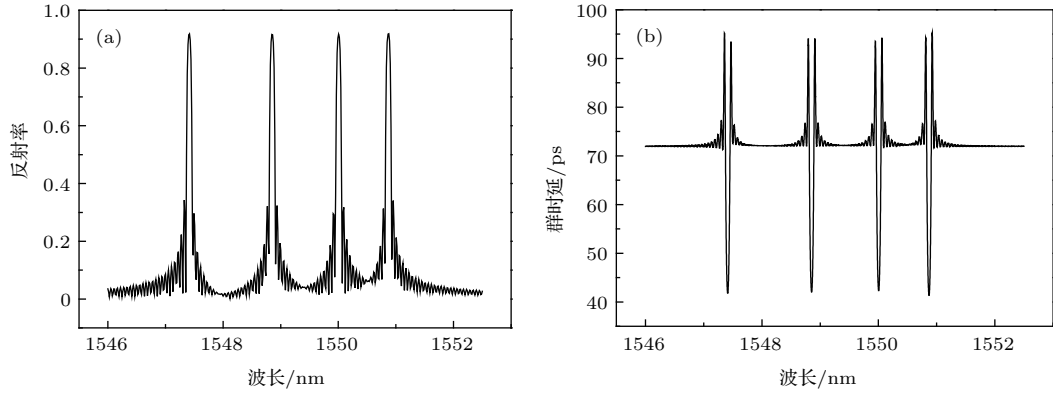


图2 四重布拉格叠栅的(a)反射光谱和(b)群时延

Fig. 2. (a) Spectrum and (b) time delay of quadruple superimposed Bragg grating.

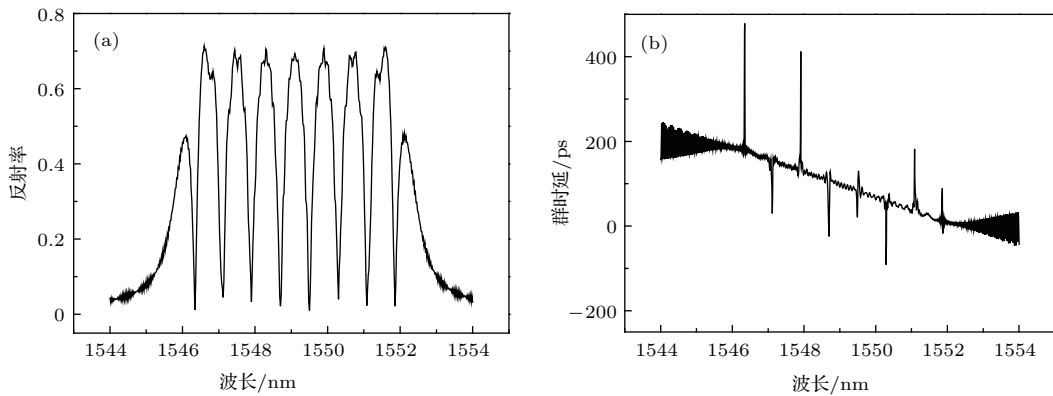


图3 二重啁啾叠栅(a)反射光谱和(b)群时延

Fig. 3. (a) Spectrum and (b) time delay of dual superimposed chirped Bragg grating.

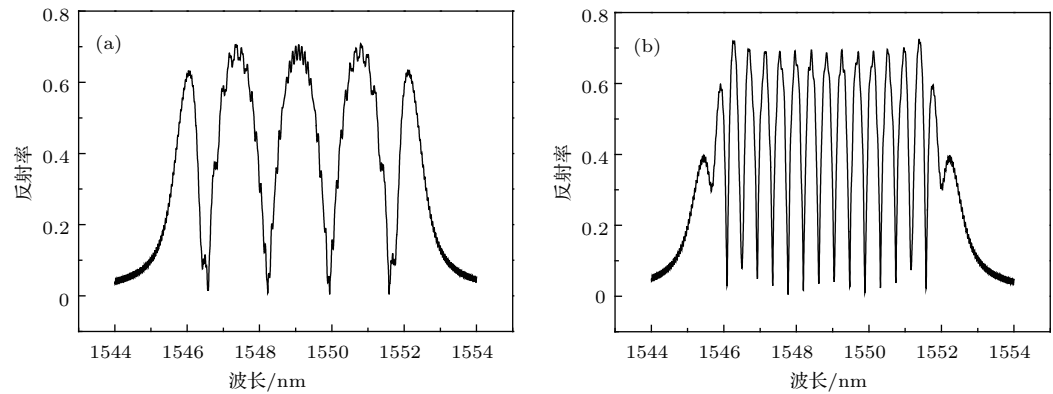


图4 不同周期差啁啾叠栅光谱 (a) $\Delta\Lambda = 0.058$ nm; (b) $\Delta\Lambda = 0.232$ nm

Fig. 4. Spectra of superimposed chirped Bragg grating with different period deviation: (a) $\Delta\Lambda = 0.058$ nm; (b) $\Delta\Lambda = 0.232$ nm.

由F-P腔谐振周期公式可知, 啁啾叠栅谐振波长间隔可通过子光栅间的周期偏差(或位置偏差)调整, 叠栅的谐振波长间隔表达式为

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2n_{eff}h} = \frac{\lambda^2 C}{2n_{eff}\Delta\Lambda}, \quad (8)$$

式中 λ 为传输光的波长, h 为谐振腔长, C 为光栅周期的啁啾系数, $C = d\Delta\Lambda dz$. 分别取啁啾叠栅中心周期差 $\Delta\Lambda = 0.058$ nm和 $\Delta\Lambda = 0.232$ nm, 对光谱进行仿真, 得到二重啁啾叠栅光谱如图4所示, 啁啾叠栅谐振波长间隔分别为1.620和0.405 nm.

3 PCF重叠光栅实验研究

3.1 PCF重叠光栅制备

我们实验所用的PCF为本课题组与武汉长盈通公司合作拉制的三角形结构的光敏PCF(截面结构如图5所示), 具有宽单模传输、易于与普通单模光纤熔接及模场面积对波长不敏感等特点. 光纤外径125 μm , 中心含掺锗纤芯, 芯径约4.5 μm , 包层空气孔直径 d 和孔间距 a 分别约3.0和5.0 μm .

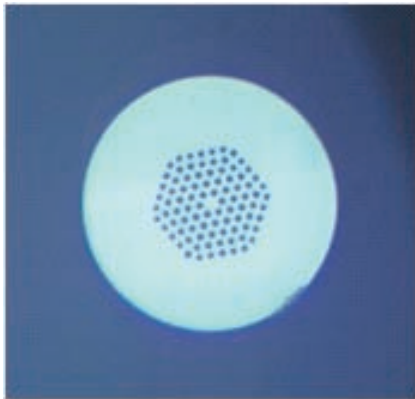


图5 (网刊彩色) 三角形结构光敏PCF截面图
Fig. 5. (color online) Cross section of triangular photonic sensitive PCF.

采用紫外曝光的相位掩模板法制备PCF叠栅, 制备系统如图6所示. 成栅光源使用ArF准分子激光器 (COMPexPro, Coherent, 美国), 工作波长为193 nm, 布拉格相位掩模板 (Ibsen, 丹麦) 周期为1077.74 nm, 啁啾相位掩模板 (StockerYale, 美国) 周期啁啾系数 C 为0.556 nm/cm; 利用柱面透镜对激光光束进行聚焦, 聚焦后的曝光能量密度为285 mJ/cm^2 ; 实验光谱参数通过光谱分析仪 (AQ6317C, Yokogawa, 日本) 观测. PCF曝光前在12 MPa, 60 $^\circ\text{C}$ 的条件下经过载氢14天的敏化处

理, 并对PCF空气孔进行折射率匹配液填充; 叠栅各子光栅的不同的谐振波长通过曝光时对光纤的拉伸控制实现.

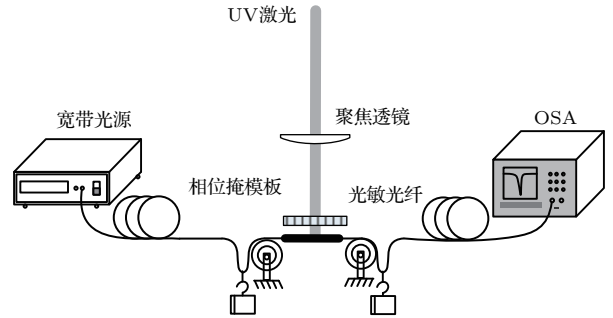


图6 PCF叠栅制备系统
Fig. 6. Experimental set-up for superimposed PCF grating writing.

3.2 实验结果及讨论

由图6所示紫外激光系统制备PCF普通布拉格光栅, 光栅光谱如图7所示, 可以看到, 在PCF布拉格光栅的透射光谱中, 除了在波长1550.7 nm处有基模耦合的主谐振峰外, 在1537.9及1527.7 nm处也存在较明显的高阶谐振峰, 但在反射光谱中只存在基模耦合的反射峰, 这是由于所用PCF为单模传输, 耦合到高阶包层模的能量在纤芯并没有形成反射峰.

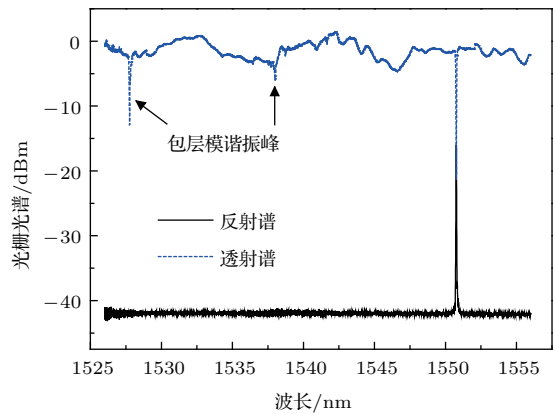


图7 PCF布拉格光栅谱
Fig. 7. Spectrum of PCF Bragg grating.

在光敏PCF上进行四次曝光, 制备PCF四重布拉格叠栅, 叠栅各子光栅的实际写入周期通过拉伸光纤调整, 光栅写入时挂置砝码分别为20, 73, 140和223 g (波长由大到小) 时, 得到等差波长间隔四重布拉格叠栅的光谱如图8所示, 波长间隔分别为0.88 nm, 1.14 nm, 1.39 nm, 光栅写入波长与挂置砝码呈线性关系, 波长漂移系数为0.0168 nm/g .

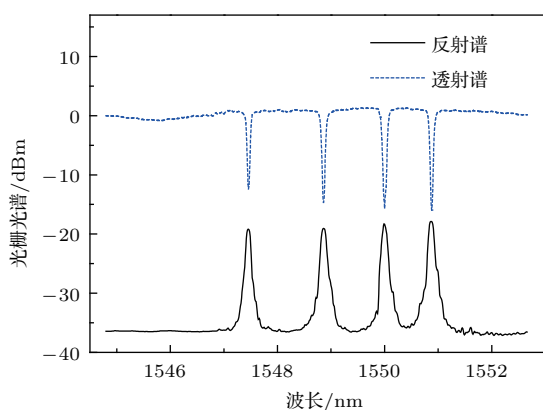


图8 PCF四重布拉格叠栅谱

Fig. 8. Spectrum of quadruple superimposed PCF Bragg grating.

由仿真和实验可知, 基于多个布拉格光栅的重叠光栅, 各子光栅参数可分别设定, 其作为多波长滤波器件具有极大的灵活性, 如各反射峰波长间隔可实现定制, 此外, 各反射的反射强度、光栅带宽等也可实现灵活调整.

通过啁啾模板制备二重啁啾叠栅, 设置两次曝光模板相对位移 $h = \Delta A/C = 1.03$ mm, 得到二重啁啾叠栅的光谱如图9所示, 谐振波长间隔0.82 nm. 实验光栅反射光谱与理论分析较好地符合.

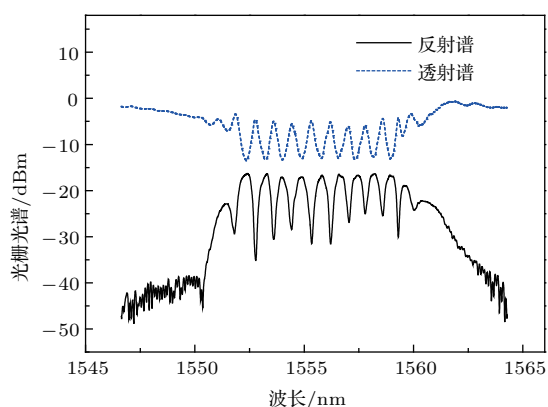


图9 PCF二重啁啾叠栅谱

Fig. 9. Spectrum of dual superimposed chirped PCF Bragg grating.

啁啾重叠光栅具有周期性的宽带滤波特性, 各反射峰幅度在干涉区域内一致, 且波长周期间隔可通过谐振腔长调整; 群时延在反射峰带宽内具有良

好的线性区间, 在多波长滤波和色散补偿方面具有良好的应用前景.

4 结 论

本文在 $V-I$ 传输矩阵法的基础上, 建立PCF叠栅矩阵模型, 计算分析了其布拉格叠栅和啁啾叠栅的反射谱和时延特性; 通过193 nm紫外激光在光敏PCF中实验制备了布拉格叠栅和啁啾重叠光栅, 研究结果显示实验光栅反射光谱与理论分析较好地符合. 研究结果为光子晶体光纤重叠光栅的设计、制备及应用提供了重要的参考依据.

参考文献

- [1] Liu L, Qin G S, Tian Q J, Zhao D, Qin W P 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 163102
- [2] Suzuki M, Baba M, Yoneya S, Kuroda H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 191110
- [3] Woodward R I, Kelleher E J R, Popov S V, Taylor J R 2014 *Opt. Lett.* **39** 2330
- [4] Huang W, Liu Y G, Wang Z, Liu B, Wang J 2014 *Opt. Express* **22** 5883
- [5] Tian F, Kanka J, Du H 2012 *Opt. Express* **20** 20951
- [6] Zhong X, Wang Y, Liao C, Liu S, Tang J, Wang Q 2015 *Opt. Lett.* **40** 1791
- [7] Ma Y C, Liu H Y, Yan S B, Yang Y H, Yang M W, Li J M, Tang J 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 55201
- [8] Sumetsky M, Ramachandran S 2008 *Opt. Express* **16** 402
- [9] Garcíamuñoz V, Preciado M A, Muriel M A 2007 *Opt. Express* **15** 10878
- [10] Han Y G, Dong X, Kim C S, Jeong M Y, Ju H L 2007 *Opt. Express* **15** 2921
- [11] Wang C, Yao J 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 882
- [12] Triollet S, Robert L, Marin E, Ouerdane Y 2011 *Meas. Sci. Technol.* **22** 298
- [13] Li T, Dong X, Chan C C, Zhao C L, Jin S 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 1706
- [14] Erdogan T 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1277
- [15] Capmany J, Muriel M A 1990 *J. Lightwave Technol.* **8** 1904
- [16] Capmany J, Muriel M A, Sales S, Rubio J J, Pastor D 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 3125
- [17] Garcia-Munoz V, Muriel M A, Capmany J 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 2343

Theoretical model and spectrum characteristics of superimposed photonic crystal fiber grating*

Jiang Peng¹⁾ Bi Wei-Hong^{1)2)†} Qi Yue-Feng¹⁾²⁾ Fu Xing-Hu¹⁾²⁾
Wu Yang¹⁾ Tian Peng-Fei¹⁾

1) (Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (Key Laboratory of Especial Optical Fiber and Fiber Sensor (Hebei Province), Qinhuangdao 066004, China)

(Received 3 May 2016; revised manuscript received 1 August 2016)

Abstract

The superimposed gratings have attracted considerable interest because they can extend the potential applications of gratings. Superimposed gratings are fabricated by inscribing multiple gratings at the same section of the fiber, and they can demonstrate various features simultaneously. A number of optical devices based on superimposed gratings have been reported, such as multi-wavelength filters, beam shapers, ultrahigh repetition rate optical pulse generators, etc. Photonic crystal fiber (PCF) can bring new optical characteristics by changing the sizes, spacings and arrangements of the air holes in the fiber. In this paper, we present the spectra of the superimposed gratings inscribed in a photonic crystal fiber. A numerical mode is proposed based on the V - I transmission matrices. The traditional cosinoidal variation of refractive index is replaced with a square-type refractive index variation, and the scattering occurs at a localized discrete location. According to the simulations, the reflection spectra and time delays of a superimposed Bragg grating and superimposed chirped Bragg grating are analyzed. A superimposed Bragg grating and a superimposed chirped Bragg grating are fabricated in the single mode photosensitive PCFs under the irradiation of a 193 nm ultraviolet laser. The superimposed Bragg grating is composed of four subgratings with resonance wavelengths at set spacings. And under a phase mask displacement of 1.03 mm, the superimposed chirped Bragg grating has a periodic resonance with a period of 0.82 nm. The results show that the spectrum of superimposed Bragg grating can be flexibly customized by the parameters of each subgrating. Superimposed chirped Bragg gratings have good linear group delays and flat periodic resonance amplitudes, and the resonance period can be adjusted by displacing the phase mask. The grating spectra obtained from experiments are in good agreement with the theoretical analyses. The research results in this paper provide an important basis for designing, fabricating, and applying the superimposed PCF gratings.

Keywords: photonic crystal fiber, superimposed photonic crystal fiber grating, V - I transfer matrix, spectrum characteristics

PACS: 42.79.Dj, 42.81.Wg, 42.81.-I

DOI: 10.7498/aps.65.204208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61475133, 61275093, 61575170), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2015203277, F2016203389, F2016203392), and the Key Basic Research Program of Hebei Province, China (Grant No. 16961701D).

† Corresponding author. E-mail: whbi@ysu.edu.cn