

doi:10.3788/gzxb20184711.1106001

飞秒激光直写长周期光纤光栅及其光谱特性

张亚妮^{1,2,3}, 郝亚茹^{1,3}, 江鹏^{1,3}, 许强^{1,3}, 王朝晋^{1,3}, 朱雨雨^{1,3}, 薛璐^{1,3}

(1 宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016)

(2 陕西科技大学 文理学院, 西安 710021)

(3 宝鸡市超快激光与新材料工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721016)

摘 要: 基于 800 nm 飞秒激光脉冲, 设计并搭建了长周期光纤光栅制备系统, 该系统通过采用 20 倍率的显微物镜将飞秒激光脉冲诱导入标准单模光纤纤芯位置, 采用水平、垂直双 CCD 视频监控方式实现对飞秒激光脉冲刻蚀长周期光纤光栅的逐点监测, 对未载氢处理的标准单模光纤进行了不同周期、不同周期长度和不同占空比刻写实验, 研究表明, 当选取激光脉冲能量为 1.3 mW、光栅周期为 500 μm 、光栅占空比为 0.6 时, 该光栅在谐振波长 1 300 nm 处最大谐振峰强度为 11.65 dB, 带外损耗低于 2 dB, 且光栅谐振波长随光栅长度不发生明显漂移; 通过光栅占空比的调整, 可实现刻写光栅光谱特性的优化设计, 使得谐振峰由多峰转为单峰。

关键词: 飞秒激光脉冲; 长周期光纤光栅; 超快微加工; 耦合模; 谐振光谱

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1106001-8

Fabrication of Long Period Fibre Gratings by Femtosecond Laser Writing Directly and Its Spectral Characteristics

ZHANG Ya-ni^{1,2,3}, XI Ya-ru^{1,3}, JIANG Peng^{1,3}, XU Qiang^{1,3},

WANG Chao-jin^{1,3}, ZHU Yu-yu^{1,3}, XUE Lu^{1,3}

(1 School of Physics and Optoelectronics Technology, Baoji University of Arts & Science, Baoji, Shaanxi 721016, China)

(2 School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

(3 Baoji Engineering Technology Research Center on Ultrafast Laser and New Materials, Baoji, Shaanxi 721016, China)

Abstract: The experimental system to write long-period fiber gratings was set up based on femtosecond laser pulses with a central wavelength 800 nm. In this system, the femtosecond laser pulses were induced in the fiber core of the normal SMF-28 by adopting a micro-objective of 20 \times , and the processing of writing long-period fiber gratings was monitored by adopting the horizontal and vertical dual-CCD video. The long-period fiber gratings with different period, different period number and different duty ratio were inscribed in no-hydrogen-loaded SMF-28 fiber. The experiment result shows that the maximum resonance peak loss of 11.65 dB will be generated at the wavelength of 1 300 nm and out-of-band loss is lower than 2 dB when the laser pulse energy is selected of 1.3 mW, the period of grating is 500 μm and the duty ratio of grating is 0.6, and the resonant wavelength of grating is not apparent drift with the length of the grating. More further, the optimal spectral characteristics of grating can be designed through the adjustment of grating duty ratio, and the resonance peak will be changed from multi-peak to single peak.

Key words: Femtosecond laser pulse; Long period fiber grating; Ultrafast micro processes in fiber;

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11647008), 陕西省国际科技合作与交流项目(No. 2018KW-016), 宝鸡市重大科技专项计划项目(No. 2015CXNL-1-3)和陕西科技大学重点科研项目(No. 2018WLXY-01-01)资助

第一作者: 张亚妮(1966-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳光子学与器件. Email: yanizhang1@163.com

通讯作者: 郝亚茹(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅与传感. Email: 739250338@qq.com

收稿日期: 2018-07-11; **录用日期:** 2018-08-23

<http://www.photon.ac.cn>

Coupled mode; Resonance spectroscopy

OCIS Codes: 060.2370; 070.7145; 320.7140; 050.2770

0 引言

光纤光栅作为光纤系统最重要的器件之一,广泛应用于传感和通信领域中^[1],并以其波峰峰位检测法有效提高了传感测量系统探测的灵敏性^[2],也可用来制作一些重要的光纤通信无源器件,如增益均衡器^[3]、滤波器^[4-6]、波长选择及耦合器等^[7].按照周期大小,光纤光栅可分为长周期光纤光栅(Long period fiber gratings, LPFGs)和布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Gratings, FBGs)^[8].FBGs通常指周期低于 $1\ \mu\text{m}$ 的光纤光栅,又称为反射光栅^[9-11].LPFGs指周期数为几十或几百微米的光纤光栅,又称为透射光栅^[12].与FBGs相比较,LPFGs具有插入损耗小、无后向反射、无需隔离器等优点^[13-14].在长周期光纤光栅制作方面,采用 CO_2 激光器刻写LPFGs具有插入损耗过大的缺点^[15];而紫外准分子激光器刻写不仅需要光纤进行特殊处理,还需借助相位掩模板,价格昂贵、不易操作^[16].随着飞秒激光技术在材料微加工处理领域的广泛应用,采用飞秒激光逐点直写LPFGs已成为光纤光栅制作的主要方法^[17-20].飞秒激光通过诱导纤芯折射率折变的多光子吸收过程进行光栅刻写,不要求光纤具有强的光敏性,而且刻写光栅具有高温稳定性、窄线宽和大折射率调制等特性^[21-22].与传统紫外曝光法相比,采用飞秒激光逐点法刻蚀LPFGs不需要相位掩模板,制作方法灵活,刻制光栅插入损耗低,残余应力小^[23].尽管飞秒激光刻蚀LPFGs已有一段历史,但在标准单模通信光纤(Corning, SMF-28)中采用飞秒激光非载氢技术刻写LPFGs一直存在最大谐振峰强度较低,带外损耗较大的问题^[24].本文基于 $800\ \text{nm}$ 飞秒激光脉冲搭建水平、垂直双CCD视频对准的飞秒激光脉冲逐点刻蚀长周期光纤光栅系统,通过采用20倍率的显微物镜将飞秒激光脉冲诱导入SMF-28纤芯位置,并通过对待刻蚀光纤的拉伸处理,以实现纤芯和包层耦合模的有效选择,提高激光与光纤对准的准确度和效率,改善光栅刻写效率和光谱特性.同时,实验研究了当刻写光栅长度和占空比发生变化时,光栅谐振波长以及谐振峰损耗强度的变化情况.

1 实验系统设计与成栅机理

采用飞秒激光逐点直写LPFGs的实验系统如图1^[25].该实验系统由飞秒激光放大器及反射镜、中性密度衰减片、显微物镜、三维自动控制移动平台(美国Newport公司,平台移动精度可达 $5\ \text{nm}$.)、光纤夹具、超连续谱宽带光源(NKT Photonics,波长范围: $500\sim 2\ 400\ \text{nm}$)、光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6370B,波长扫描范围: $1\ 200\sim 1\ 700\ \text{nm}$)、监控设备CCD等组成.其中飞秒激光器采用中心波长为 $800\ \text{nm}$ 、脉宽为 $100\ \text{fs}$ 、重复频率为 $1\ \text{kHz}$ 、最大脉冲能量为 $3.5\ \text{W}$ 的掺钛蓝宝石激光器.激光脉冲经过反射镜、圆形衰减片、光阑等进行激光脉冲整形、衰减后通过20倍显微物镜聚焦于康宁SMF-28光纤纤芯(纤芯直径 $8.2\ \mu\text{m}$,包层直径 $125\ \mu\text{m}$,数值孔径 0.14).圆形衰减片将飞秒激光能量衰减至期望值 $1.3\ \text{mW}$ 附近.去掉涂覆层的单模

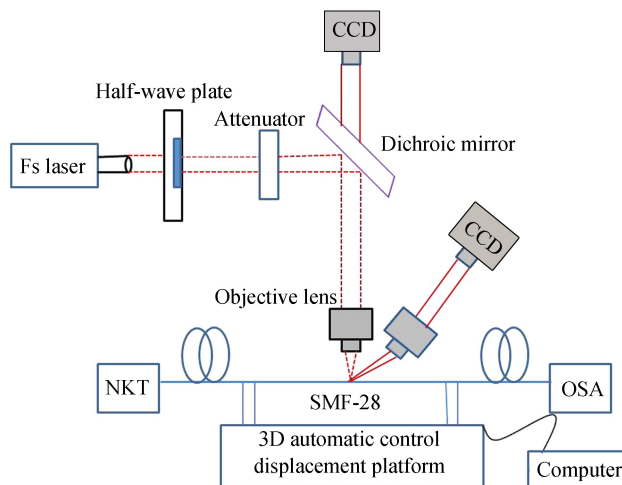


图1 飞秒激光脉冲刻写LPFGs实验系统

Fig.1 Experimental system of femto-second laser carving LPFGs

光纤被置于计算机控制的高精度三维自动控制移动平台上. 在系统中引入水平和垂直双 CCD 实时监测激光脉冲照射在光纤纤芯的精确位置, 通过二维 CCD 精确调整夹持光纤夹具的两个平面(X-Y 平面和 X-Z 平面), 在光栅长度方向 60 mm 范围内精准控制激光脉冲聚焦于待加工光纤纤芯. 此外, 自行开发编写的控制软件操控高精度的三维移动平台和激光器内嵌的 shutter 开关实现对 LPFGs 刻写周期 Δ 、占空比 D (长周期光栅占空比是表征光栅性能非常重要的指标之一, 通常定义为光栅在一个周期内折射率发生变化部分与光栅周期之比)、扫描速度与刻写轨迹进行控制, 采用超连续谱宽带光源和光谱分析仪实时监测光栅刻写过程中 LPFGs 光谱的变化. 采用电子显微镜可观察光纤纤芯材料的折射率变化及纤芯显微结构, 图 2 为刻写的 LPFGs 显微结构, 可以清楚地看出飞秒激光逐点扫描和未扫描纤芯材料折射率的明显差异.

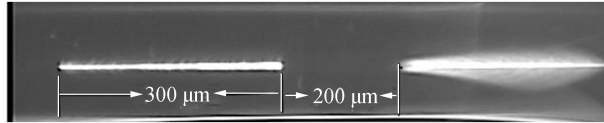


图 2 飞秒激光逐点扫描后纤芯折射率变化显微结构

Fig.2 Microscopic image in fiber core refractive index by scanning of femto-second laser

理论分析表明, 理想的均匀光纤波导, 纤芯与包层之间的各阶次模式相互正交, 不存在模式耦合. 光纤光栅的制备, 破坏了光纤波导光学特性的一致性, 在光纤纤芯中沿轴向形成不可恢复的周期性折射率调制而成栅. 根据长周期光纤光栅的耦合模理论^[26], 基于三层光纤模型对 LPFGs 模式耦合的研究发现^[27], 其模式耦合表现为前向传输的纤芯基模(LP₀₁)和一阶各次包层模 LP_{0,m} ($m = 2, 3, 4, 5, \dots$)之间的耦合, 其中, 前向传输的纤芯基模(单模光纤)与同向一阶各次包层模模场分布见图 3. LPFGs 满足的相位匹配条件为^[28]

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}) \Delta \quad (1)$$

式中, λ_{res} 为谐振波长, $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 为纤芯基模有效折射率, $n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}$ 为 m 阶包层模的有效折射率, Δ 为 LPFGs 光栅周期. 长周期光纤光栅周期较长, 模式耦合的结果是透射谱出现一系列的谐振, 满足相位匹配条件的波长将纤芯模耦合进包层中消耗掉, 形成透射谱中的谐振损耗峰, 表现出极好的带阻滤波特性.

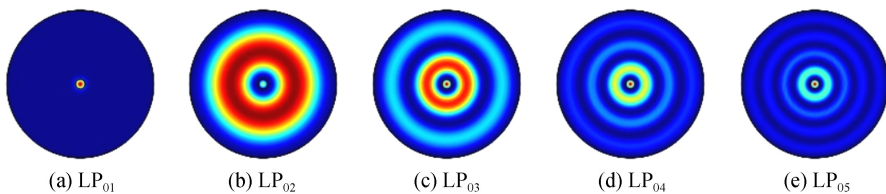


图 3 LPFGs 基模 LP₀₁ 与一阶各次包层模的模场示意图

Fig.3 Schematic diagram of the mode field of LPFGs fundamental mode LP₀₁ and first-order cladding modes

2 实验结果与讨论

将未做载氢处理的标准单模光纤 SMF-28 去掉涂覆层, 利用光纤夹具将其固定在高精度三维移动平台上, 受计算机软件控制的三维移动平台控制光纤按照一定的步进速度移动, 根据光栅刻写周期和占空比确定光纤步进速度和飞秒激光能量及曝光时间. 实验中, 控制光纤电动平移速度为 10 $\mu\text{m/s}$, 飞秒激光脉冲功率经衰减片降为 1.3 mW, 分别改变刻写光栅周期、光栅占空比和光栅长度, 观察光栅透射谱最大损耗谐振峰和带外损耗变化情况.

2.1 LPFGs 透射谱随光栅周期的变化

选取光栅刻写占空比 $D=0.5$ 不变, 改变光栅刻写周期为 400 μm 、450 μm 、500 μm 时, 观察不同刻写周期时光栅透射谱, 得到 LPFGs 归一化透射谱变化情况如图 4. 由图 4(a)中可以看出, 若选取光栅刻写周期为 $\Delta=400 \mu\text{m}$, 在 1 200~1 700 nm 的波长范围内, 获得了纤芯基模 LP₀₁ 与一阶偶次包层模 LP₀₂、LP₀₄ 耦合形成的损耗谐振峰, 其在谐振波长 1 312 nm 和 1 425 nm 处得到最大谐振峰强度分别为 8.5 dB 和 13.4 dB. 当周期增加至 450 μm 时, 则发现纤芯基模 LP₀₁ 与一阶各次包层模 LP₀₂、LP₀₃、LP₀₄、LP₀₅ 发生了四次耦合^[29], 如图 4(b), 其谐振波长分别为 1 310 nm、1 352 nm、1 436 nm、1 614 nm, 其对应的谐振峰强度分别为 2.7 dB、5.0 dB、7.74 dB、7.3 dB, 整体谐振峰强度呈现减弱趋势. 进一步增加光栅刻写周期为 500 μm 时, 从图

示 4(c)可以看出,在 1 200~1 700 nm 的波长范围内,纤芯基模 LP_{01} 仅与包层模 LP_{02} 耦合产生最大谐振峰,其对应谐振峰波长和谐振峰强度分别为 1 271 nm 和 14.5 dB,纤芯基模 LP_{01} 由于与其余包层模 LP_{03} 、 LP_{04} 、 LP_{05} 过耦合而谐振峰明显衰减,其纤芯基模 LP_{01} 与包层模 LP_{04} 耦合在波长 1 546 nm 处谐振峰强度退化为 5.5 dB,致使带外损耗明显减小,透射谱呈现单模趋势.因此,随着光栅刻写周期的增大,高阶包层模谐振峰呈现削弱趋势,说明高阶包层模与纤芯模的耦合强度在不断减弱,最大损耗谐振峰由高阶模向低阶模转移,最终致使纤芯基模 LP_{01} 与包层模 LP_{02} 耦合产生的谐振波长向短波方向发生蓝移,且最大谐振峰强度呈现增大趋势,谐振峰脉宽呈现变窄趋势.

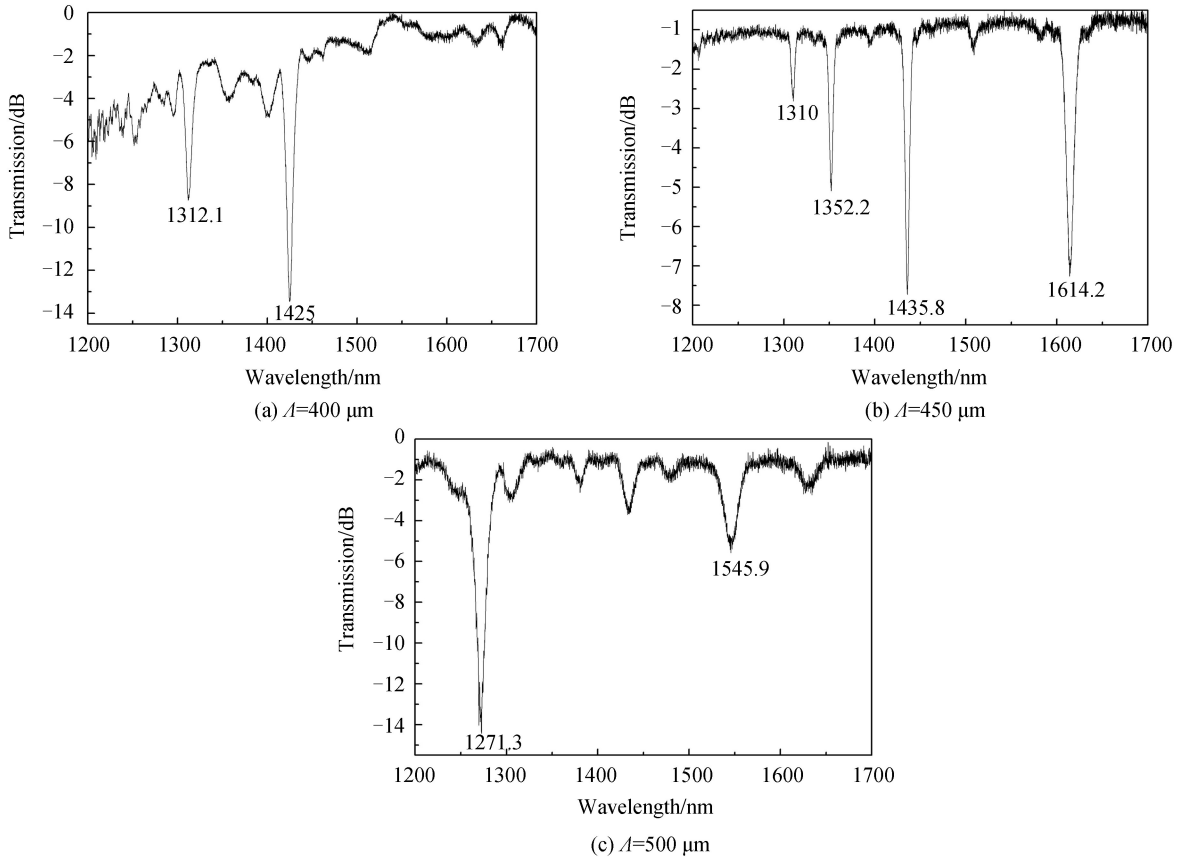
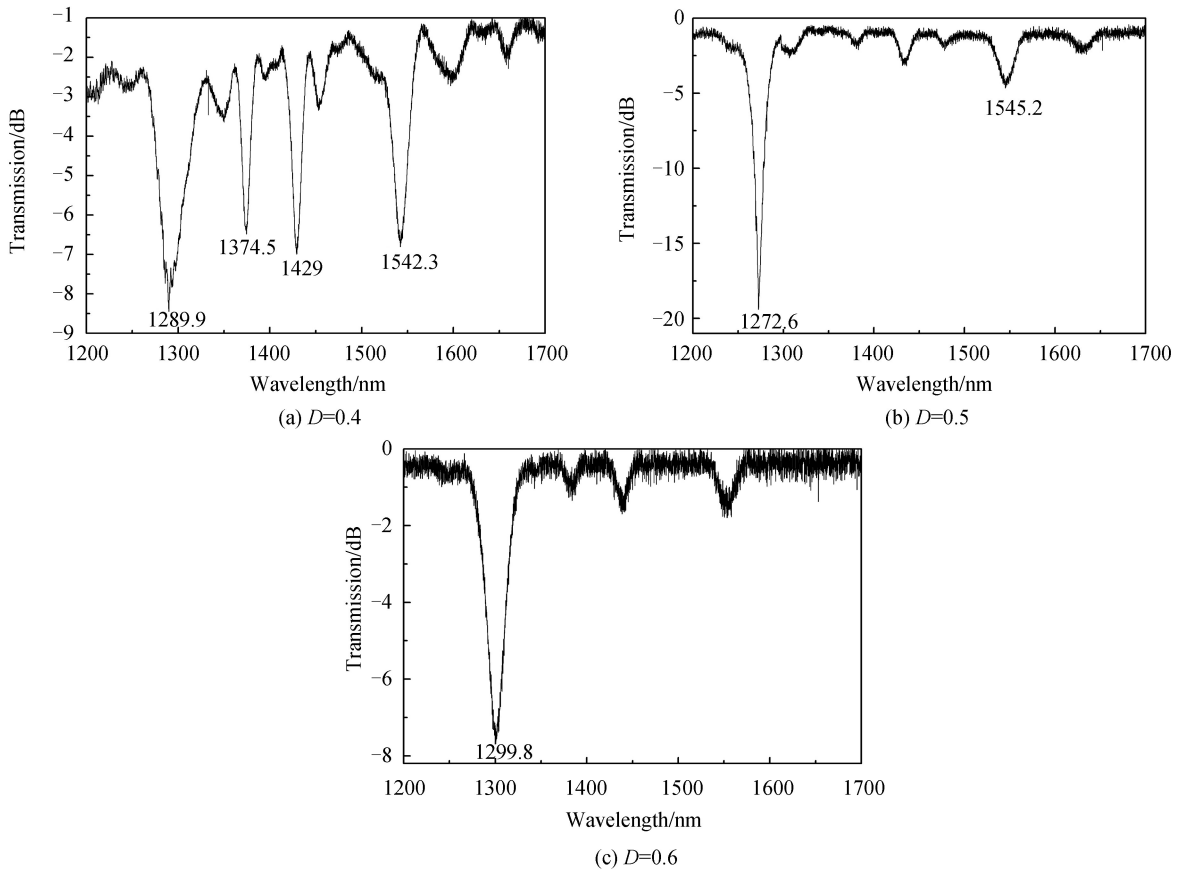


图 4 LPFGs 取不同周期时透射谱随波长的变化 ($D=0.5$)

Fig.4 Transmission spectrum of LPFGs with wavelength at different period ($D=0.5$)

2.2 LPFGs 透射谱随占空比的变化

选取光栅刻写周期为 $\Lambda=500 \mu\text{m}$ 不变,改变光栅刻写占空比分别为 0.4、0.5 和 0.6 时,观察刻写不同周期数时光栅透射谱,得到其归一化透射谱变化情况如图 5.从图 5 可以看出,当选取光栅占空比为 0.4 时,在 1 200~1 700 nm 的波长范围内,纤芯基模 LP_{01} 与各阶包层模 LP_{02} 、 LP_{03} 、 LP_{04} 、 LP_{05} 发生了 4 次耦合,如图 5(a),其谐振波长分别为 1 290 nm、1 375 nm、1 429 nm、1 542 nm,对应的谐振峰强度分别为 8.5 dB、6.5 dB、7 dB、6.9 dB. 当光栅占空比增加至 0.5 时,纤芯基模 LP_{01} 与包层模 LP_{02} 、 LP_{05} 发生两次耦合,如图 5(b),其谐振波长分别在 1 273 nm 和 1 545 nm 附近,对应的谐振峰强度分别为 19.6 dB 和 5 dB,且带外损耗不足 2 dB. 可以看出,纤芯基模 LP_{01} 与包层模的耦合导致基波谐振峰取得最大值,消除了二次谐波与三次谐波,四次谐波的谐振损耗峰在波长 1 545 nm 处退化为 5 dB 左右. 进一步增大光栅刻蚀占空比为 0.6,在波长 1 200~1 700 nm 处仅出现了一个明显的谐振损耗峰,如图 5(c),其对应谐振波长在 1 300 nm 附近,谐振峰强度接近 7.95 dB,即纤芯基模 LP_{01} 与包层模耦合的结果导致二次、三次、四次耦合谐振峰均明显退化,仅有基波谐振峰取得最大值. 由此可见,通过对长周期光纤光栅占空比的设计,可消除刻蚀光栅部分高阶谐振波的影响,在占空比逐渐增大时,损耗峰逐渐由多峰转变为单峰,且占空比为 0.5 时可消除二次、三次谐波,光栅基波谐振峰损耗取得最大值,带外损耗较低,具有较好的光谱质量.

图5 LPFGs取不同占空比时的透射谱随波长变化($\Lambda=500\ \mu\text{m}$)Fig.5 Transmission spectrum of LPFGs with wavelength at different duty ratio ($\Lambda=500\ \mu\text{m}$)

2.3 LPFGs透射谱随光栅长度的变化

选取光栅周期 $\Lambda=500\ \mu\text{m}$,光栅占空比 $D=0.6$ 不变,观察并记录了随着光栅刻写长度的增加,LPFGs透射谱随波长的变化情况如图6所示.由图可知,当刻写光栅长度较短时($L<10\ \text{mm}$),几乎观察不到明显的谐振峰,说明光栅处于欠耦合状态,纤芯基模的能量还没有完全耦合到包层模.随着光栅刻写长度的增加($L>15\ \text{mm}$),其透射谱在波长1200~1700 nm中出现四个明显的谐振损耗峰,谐振峰波长分别位于1300 nm、1382 nm、1434 nm和1550 nm处,且随着光栅刻写长度的增加,谐振峰在波长1300 nm处的强度呈现增强态势,而其他谐振波长处则呈现减弱趋势.当光栅刻写长度 $L=35\ \text{mm}$ 时,基波谐振峰强度为最大值,二次、三次、四次耦合谐振峰退化为最小,与各个谐振峰波长相对应的谐振峰强度值分别为11.65 dB、2 dB、3 dB和3.2 dB,即透射谱呈现单峰趋势.图6进一步表明当光栅刻写长度 $L<35\ \text{mm}$ 时,随着刻写长度的增加,基波谐振峰强度逐渐增加,带宽变窄,这是由于当光栅长度在30~35 mm之间光栅尚处于欠耦合状态,即在谐振波长处纤芯模的能量没有完全耦合到包层模;而当光栅长度 $L=35\ \text{mm}$ 时,光栅处于临界耦合,实现了谐振波长处纤芯基模的能量完全耦合到包层模;随着光栅刻写长度的进一步增大,当光栅长度 $L=40\ \text{mm}$ 时,谐振峰损耗反而变小,此时光栅处于过耦合状态,即耦合到包层的能量又重新回到纤芯模.图7对比分析了在谐振波长1300 nm处光栅欠耦合、临界耦合和过耦合的变化情况.在谐振波长1300 nm处基波谐振峰强度随光栅刻写长度变化情况如图8,可以看出基波谐振峰强度值先增大后减小,体现了光栅刻写过程中基波谐振峰强度随光栅长度变化的欠耦合、临界耦合和过耦合过程,其基波谐振峰最大强度值为11.65 dB.图9表示了光栅刻写过程中,谐振峰波长随光栅刻写长度的变化,可以看出其谐振峰波长随光栅长度增加并无明显漂移.因此,光栅刻写长度几乎不影响谐振波长的变化.

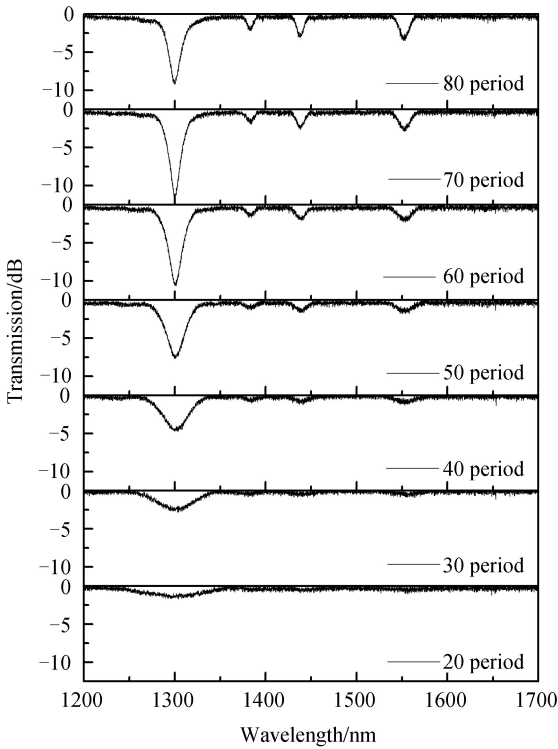


图6 LPFGs在不同刻写长度下的透射谱

Fig.6 Transmission spectra of LPFGs with different grating length

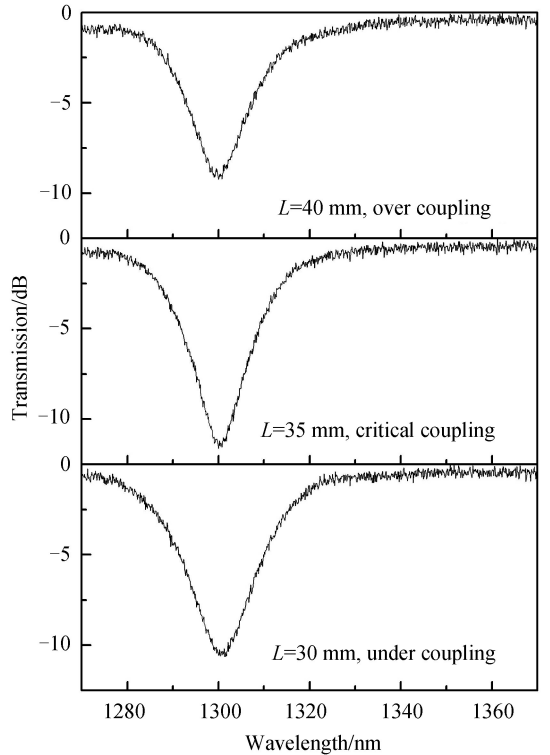


图7 LPFGs在波长1300 nm处谐振峰欠耦合、临界耦合与过耦合

Fig.7 The under-coupling, critical coupling and over-coupling of resonance peak at wavelength of 1300 nm for transmission spectra of LPFGs

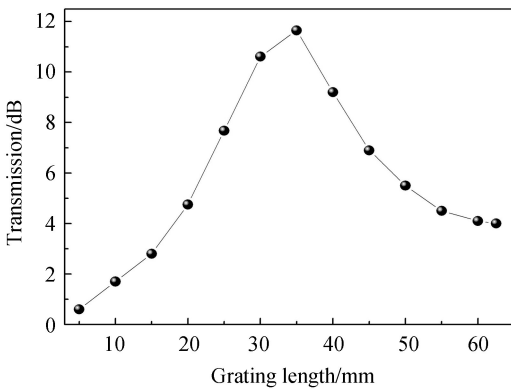


图8 LPFGs在谐振波长1300 nm处的谐振峰损耗随光栅长度变化

Fig.8 Resonance peak loss of LPFGs with length of grating at the wavelength of 1300 nm

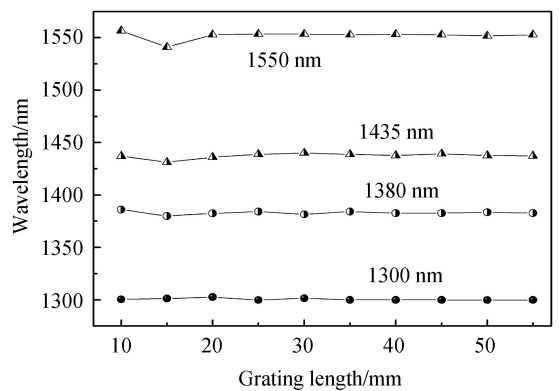


图9 LPFGs不同谐振波长随光栅长度的变化

Fig.9 Different resonance wavelengths of LPFGs with length of grating

3 结论

利用800 nm飞秒激光脉冲直写技术对康宁标准单模光纤SMF-28纤芯实现了非载氢长周期光纤光栅刻写,研究了光栅刻写过程中的光栅周期、光栅占空比和光栅长度等刻写参数对光栅生长机理和光谱特性的影响.结果表明,随着光栅刻写周期的增大,高阶包层模谐振峰呈现削弱趋势,最大损耗谐振峰由高阶模向低阶模转移,致使纤芯基模 LP_{01} 与包层模耦合产生的谐振波长向短波方向发生蓝移;通过对长周期光纤光栅占空比的设计,可消除刻蚀光栅高次谐振波的影响,随着光栅刻写占空比的逐渐增大,谐振损耗峰逐渐由多峰转变为单峰,可实现谐振波长和共振损耗峰的合理分布,特别是占空比为0.5时可消除二次、三次谐波,弱化四次谐波,获得了基波谐振峰强度最大值达到19.6 dB、光栅带外损耗不足2 dB的光谱质量.进一步,随着

光栅刻写长度的增加(周期数增大),LPFGs基波谐振峰损耗值呈现先增大后减小的趋势,体现了光栅刻写过程中纤芯基模到包层模的欠耦合、临界耦合和过耦合的光栅成栅机理。然而,其谐振波长并不随光栅刻写长度发生明显漂移。研究结果对研制某些特殊应用功能的LPFGs有一定的理论参考价值。

参考文献

- [1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1442-1463.
- [2] JING Shi-mei, ZHANG Xuan-yu, LIANG Ju-fa, *et al.* Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics[J]. *Chinese Optics*, 2017, **10**(4): 449-454.
敬世美, 张轩宇, 梁居发, 等. 飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性[J]. 中国光学, 2017, **10**(4): 449-454.
- [3] VENGSARKAR A M, LEMAIRE P J, ERDOGAN T. Long-Period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, **14**(1): 58-65.
- [4] LEE H, AGRAWAL G P. Bandwidth equalization of purely phase-sampled fiber Bragg gratings for broadband dispersion and dispersion slope compensation[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(23): 5595-5602.
- [5] DIANA V, JOEL P C, LUIS C, *et al.* Long-period grating fiber sensor with in situ optical source for remote sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(20): 1533-1535.
- [6] VENGSARKAR A M, PEDRAZZANI J R, JUDKINS J B, *et al.* Long-period fiber grating based gain equalizers[J]. *Optics Letter*, 1996, **21**(5): 336-338.
- [7] WU Min, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling, *et al.* A long distance FBG sensor system based on LPFG denoising and hybrid amplification[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, **18**(11): 1289-1292.
吴敏, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于LPFG滤噪和混合放大的长距离FBG传感器系统[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(11): 1289-1292.
- [8] LI Chuan, ZHANG Yi-mo, ZHAO Yong-gui. Fiber grating: principle, technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2005.
李川, 张以谟, 赵永贵. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] LI H, YANG H, LI E, *et al.* Wearable sensors in intelligent clothing for measuring human body temperature based on optical fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(11): 11740-11752.
- [10] LI H, LI Y, LI E, *et al.* Temperature-insensitive arrayed waveguide grating demodulation technique for fiber Bragg grating sensors[J]. *Optics and Laser Technology*, 2013, **51**(5): 77-81.
- [11] LI Hong-qiang, MA Xiang-dong, CUI Bei-bei, *et al.* Chip-scale demonstration of hybrid III-V/silicon photonic integration for an FBG interrogator[J]. *Optica*, 2017, **4**(7): 692-700.
- [12] LI Da, HE Wei, YAN Guang, *et al.* LPFG Fabricated by femtosecond laser and its characteristics of refractive index of liquid[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2017, **38**(3): 325-329.
李达, 何巍, 闫光, 等. 飞秒直写长周期光纤光栅及其液体折射率特性研究[J]. 半导体光电, 2017, **38**(3): 325-329.
- [13] LIN Jun. The pressure sensing research on long-period fiber grating [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.
林君. 基于长周期光纤光栅的压力传感研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- [14] YANG Rui-zhu. Characterization and sensing application of long period fiber gratings[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
杨蕊竹. 长周期光纤光栅的特性及传感应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [15] ZHU Tao, RAO Yun-jiang, MO Qiu-ju. Ultra-long period fiber grating written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2005, **34**(1): 1697-1700.
朱涛, 饶云江, 莫秋菊. 高频CO₂激光脉冲写入的超长周期光纤光栅[J]. 光子学报, 2005, **34**(11): 1697-1700.
- [16] Hill K O, MALO B, BILODEAU F. Bragg gratings fabricated in mono-mode photosensitive optical fiber by UV exposure thorough a phase mask[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **62**(10): 1035-1037.
- [17] ZHANG Xin-cheng. Fabrication and characterization of fiber microstructure based on femtosecond laser[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2015.
张新城. 基于飞秒激光的光纤微结构制备及特性研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2015.
- [18] MARTINEZ A, DUBOV M, KHRUSHCHEV I, *et al.* Photo induced modifications in fiber gratings inscribed directly by infrared femtosecond irradiation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(21): 2266-2268.
- [19] MARTINEZ A, KHRUSHCHEV I, BENNION I. Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(11): 1603-1605.
- [20] ZHANG N, YANG J J, WANG M W, *et al.* Fabrication of long-period fiber gratings using 800 nm femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Physics Letter*, 2006, **23**(12): 3281-3284.
- [21] ALLSOPT T, KALLI K, ZHOU K, *et al.* Long period gratings written into a photonic crystal fibre by a femtosecond laser as directional bend sensors [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(20): 5092-5096.

- [22] WANG Ying. Experimental investigation on the fabrication of volume grating and novel fiber sensors based on femtosecond laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
王英. 飞秒激光制作体光栅及新型光纤传感器件的实验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.
- [23] LU Jun-hui, SHI Jie-long, CHEN Yuan-yuan, *et al.* Strain characteristics of long period fiber gratings written by femtosecond lasers[J]. *Journal of Shanghai University*, 2012, **18**(4): 379-383.
陆君辉, 施解龙, 陈圆圆, 等. 飞秒激光刻写长周期光纤光栅的应变特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, **18**(4): 379-383.
- [24] FUJII T, FUKUDA T, ISHIKAWA S, *et al.* Characteristics improvement of long-period fiber gratings fabricated by femtosecond laser pulses using novel positioning technique[C]. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, 2004: THC6.
- [25] ZHANG Ya-ni, LIU Si-cong, ZHAO Ya, *et al.* Fabrication mechanism of long-period fiber grating based on 800nm high intensity femto-second laser pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(1): 0106003
张亚妮, 刘思聪, 赵亚, 等. 800 nm 高能量飞秒激光脉冲刻写长周期光纤光栅机理[J]. 光子学报, 2018, **47**(1): 0106003
- [26] ERDOGAN T. Cladding mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(8): 1760-1773.
- [27] ERDOGAN T. Cladding mode resonances in short and long period fiber grating filters; errata[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, **17**(11): 2113.
- [28] HE Wan-xun, SHI Wen-kang, YE Ai-lun. Fiber long-period grating coupling constant[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(6): 535-536+538.
何万迅, 施文康, 叶爱伦. 长周期光纤光栅耦合常数的研究[J]. 光学技术, 2002, **28**(6): 535-536+538.
- [29] LI Yu-qiang, ZHOU Heng-wei. Coupling characteristics of long-periods fiber grating and the simulation analysis[J]. *Journal of Zaozhuang University*, 2015, **32**(2): 17-24.
李玉强, 周恒为. 长周期光纤光栅的耦合特性及模拟分析[J]. 枣庄学院学报, 2015, **32**(2): 17-24.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 11647008), the International Science & Technology Cooperation and Exchanges Project of Shaanxi (No. 2018KW-16), the Key Sciences and Technology Project of Baoji City (No. 2015CXNL-1-3) and the Key research project of Shaanxi University of Science & Technology (No. 2018WLXY-01-01)

引用格式: ZHANG Ya-ni, XI Ya-ru, JIANG Peng, *et al.* Fabrication of Long Period Fibre Gratings by Femtosecond Laser Writing Directly and Its Spectral Characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1106001
张亚妮, 郗亚茹, 江鹏, 等. 飞秒激光直写长周期光纤光栅及其光谱特性[J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1106001