

doi:10.3788/gzxb20184701.0106003

800 nm 高能量飞秒激光脉冲刻写长周期 光纤光栅机理

张亚妮^{1,2}, 刘思聪^{1,2}, 赵亚^{1,2}, 许强^{1,2}, 王勇刚³

(1 宝鸡文理学院 物理与光电技术学院, 陕西 宝鸡 721016)

(2 宝鸡市超快光学与新材料工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721016)

(3 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘 要:基于 800 nm 飞秒激光脉冲对标准单模光纤采用非载氢技术刻写长周期光纤光栅的机理进行了研究.搭建了水平、垂直双 CCD 视频监控的飞秒激光脉冲逐点刻蚀长周期光纤光栅系统,研究了光栅长度、激光脉冲能量和光栅占空比等参数对光栅光谱特性的影响.研究表明,当光栅周期长度不变,光栅周期数和激光脉冲能量的变化使光栅谐振峰强度发生变化,光栅透射谱是单峰的;光栅占空比的改变导致光栅谐振峰由单峰转变为多峰.在谐振波长 1 540 nm 处,得带谐振峰强度达到 15 dB、带外损耗不足 2 dB,在 3 dB 衰减处带宽为 15 nm 的谐振透射谱.

关键词:长周期光纤光栅;飞秒激光;超快微加工;耦合模;峰值损耗

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0106003-7

Fabrication Mechanism of Long-period Fiber Grating Based on 800 nm High Intensity Femto-second Laser Pulses

ZHANG Ya-ni^{1,2}, LIU Si-cong^{1,2}, ZHAO Ya^{1,2}, XU Qiang^{1,2}, WANG Yong-gang³

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

(2 Baoji Engineering Technology Research Centre on Ultrafast Optics and New Materials, Baoji, Shaanxi 721016, China)

(3 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The fabrication mechanism of Long-Period Fiber Gratings (LPFGs) in standard SMF-28 telecommunication fibers without hydrogen loading were explored by using direct writing method based on femtosecond laser pulses, with pulse duration of 100 fs, 1kHz repetition rate and a central wavelength of 800 nm. The experimental system to write LPFGs is adopted directly the horizontal and vertical double CCD video to realize monitoring and alignment of fiber. The LPFGs with different spectral characteristics were fabricated by adjusting the number of grating period, energy density of laser irradiation and duty ratio. The result shows that resonance peak loss generate single-peak when the period of grating is constant, and the variations of the number of grating periods and pulse energy of laser irradiation will lead to the change of resonance peak loss. The variations of duty ratio will lead to the generation of resonance rejection band of LPFGs from single-peak to multi-peak plus lesser out-of-band loss. And finally, a resonance transmission spectra with 15 dB attenuation, 3 dB bandwidth of 15 nm, and less than

基金项目:国家自然科学基金(No.11647008),陕西省国际合作科技合作与交流项目(No.2014KW07-01),陕西省科技发展项目(No.2014K08-17)和宝鸡市重大科技专项计划项目(No.2015CXNL-1-3)资助

第一作者(通讯作者):张亚妮(1966—),女,教授,博士,主要研究方向为微纳光子学与光子晶体光纤. Email:yanizhang1@163.com

收稿日期:2017-07-25; **录用日期:**2017-10-16

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

2 dB out-of-band losses at wavelength of 1 540 nm was obtained.

Key words: Long-Period Fiber Grating (LPFG); Infrared femtosecond laser; Ultrafast micro processes in fibers; Coupled mode; Peak loss

OCIS Codes: 060.2370; 070.7145; 320.7140; 050.2770; 060.2400

0 引言

光纤光栅作为一种新型的光纤器件,在光纤传感和光纤通信两大领域受到越来越广泛的关注^[1-3].光纤光栅根据周期长度可分为 Bragg 光纤光栅和长周期光纤光栅.通常把周期小于 $1\mu\text{m}$ 的光纤光栅称为光纤 Bragg 光栅或反射光栅;而把周期为几十或几百 μm 的光栅称为长周期光纤光栅(Long Period Fiber Gratings, LPFGs)或透射光栅.长周期光纤光栅(LPFGs)作为一种重要的新型光纤光栅滤波器,凭借其独特的优势,如插入损耗小、阻带宽、后向反射低、传感灵敏度高、抗腐蚀、体积小等,在光纤通讯、光纤传感等领域得到了广泛的应用和发展.1996年, Vengsarkar 等采用振幅掩模板制作了第一根 LPFGs^[4].近年来,随着飞秒激光技术在材料微加工处理方面的进一步应用,采用飞秒激光逐点直写 LPFGs 已经成为光纤光栅制作的主要方法^[5-9].飞秒激光通过诱导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,刻写的光栅具有高的温度稳定性、窄的线宽和大的折射率调制等特性,在高温传感和光纤激光器等方面具有潜在的应用价值^[10].与传统紫外曝光方法相比,飞秒激光逐点直写法不需要相位掩模板,制作方法灵活,所刻制光栅插入损耗低,残余应力小.尽管采用飞秒激光刻蚀 LPFGs 已经有 10 年的历史^[11],但在标准单模通信光纤中采用非载氢飞秒激光刻写 LPFGs 的损耗最大没有超过 10 dB,并且带外损耗较大的问题一直没有克服^[9,12].本文基于 800 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,该系统通过对待刻蚀光纤的拉伸处理,实现纤芯和包层耦合模的有效选择,提高了激光与光纤对准的准确度和效率,使得光栅刻写效率和光谱特性得到了有效改善.同时,进一步研究了飞秒激光刻蚀 LPFGs 的机理,实验探索了光栅周期数、激光脉冲能量、光栅占空比等参数对 LPFGs 透射谱的影响,得到了占空比为 0.4、光栅周期为 $500\mu\text{m}$ 时,光栅谐振峰呈现单峰,且光栅长度为 40 个周期时,最大谐振峰强度为 12.3 dB,带外损耗不足 2 dB 的透射谱;当占空比改变为 0.5、光栅周期为 $500\mu\text{m}$ 时,LPFG 在波长 $1\ 200\sim 1\ 700\text{ nm}$ 范围谐振峰由单峰过渡为多峰,呈现 3 个明显的谐振峰并整体红移,且谐振峰强度随着光栅周期数的增加而增大的现象,最终获得了谐振波长在 $1\ 540\text{ nm}$ 处、谐振峰强度达到 15 dB、带外损耗不足 2 dB、在 3 dB 衰减处带宽为 15 nm 的谐振透射谱.

1 实验系统设计和刻写工艺

1.1 实验系统设计

采用飞秒激光逐点直写 LPFGs 的实验系统如图 1.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、3 维自动控制移动平台(Newport Inc.)、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, 扫描范围: $1\ 200\sim 1\ 700\text{ nm}$)、监控 CCD 等组成.首先中心波长 800 nm、脉冲宽度 100 fs、重复频率 1 kHz 的飞秒激光脉冲通过两个高反射镜、 45° 分光镜、中性密度衰减片和 25 倍的显微物镜聚焦引导到光纤纤芯,其中衰减片将激光脉冲能量衰减至期望值,用光功率计测得其单脉冲能量大约为 0.4 到 $1.3\mu\text{J}$.为了快速精确地调节光纤位置,设计了基于水平、垂直双 CCD 监控的光纤准直调节与对准系统,其中 CCD_1 放置在激光束入射方向即 X 方向的后向,飞秒激光照射光纤经光纤表面产生的反射光通过显微物镜、高反镜及透镜后放大成像在 CCD_1 相机并显示在监视器上; CCD_2 放置在激光刻写端的上面以监控光纤和聚焦透镜之间的距离.一端接超连续谱宽带光源,另外一端接光谱分析仪的单模裸光纤(SMF-28, Corning Inc.)被固定在精密三维自动位移平台上.三维自动位移平台的移动速度和方向通过控制器和计算机进行控制,校准好的三维自动位移平台控制光纤以 $25\mu\text{m/s}$ 的速度沿光纤轴向平移,聚焦纤芯的飞秒激光脉冲依据设定好的光栅周期沿光纤轴向进行逐点曝光刻写,光栅长度变化范围从 20 到 40 mm 不等,光栅周期和占空比可以通过设计好的控制软件任意调整.采用逐点写入法,即光纤相对于激光聚焦点沿轴向恒速移动,逐点诱导聚焦区域光纤的折射率改变从而形成光栅结构.借助电子显微镜,可以观察光纤纤芯位置在激光曝光后的显微结构变化,图 2 是飞秒激光脉冲刻写的 LPFGs 显微结构照

片,其光栅周期 $\Lambda=500 \mu\text{m}$, 占空比 $D=0.4$, 光栅长度用变量 L 来表示. 从图中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.

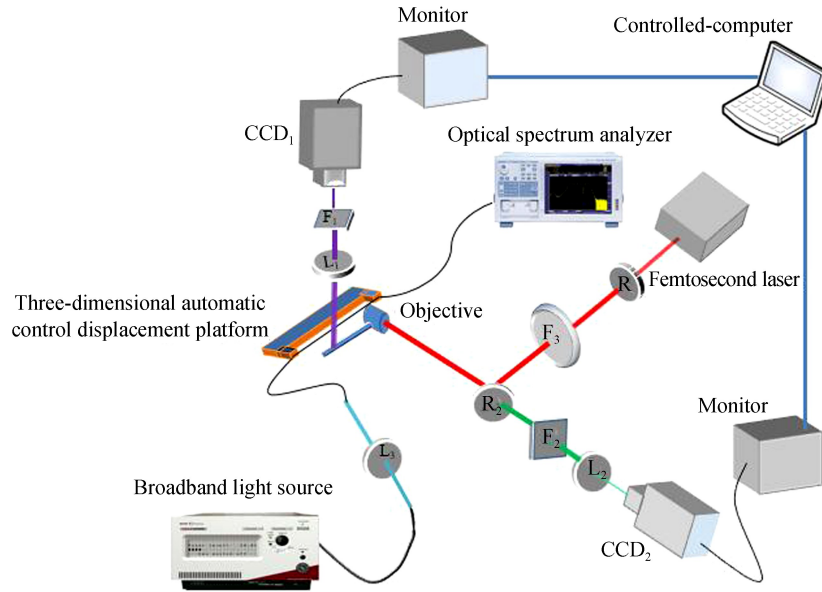


图1 飞秒激光脉冲刻写 LPFGs 实验系统

Fig.1 Schematic diagram of femto-second laser carving LPFGs

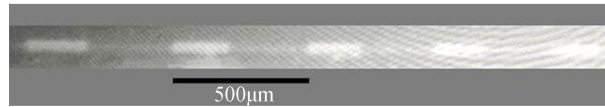


图2 飞秒激光逐点扫描后纤芯折射率变化显微结

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

1.2 飞秒激光逐点法刻写光纤光栅的工艺

- 1) 开启激光器, 调节衰减片, 观察激光脉冲能量大小, 调节激光脉冲能量到 $0.4 \sim 1.3 \mu\text{J}$;
- 2) 取一段标准单模光纤, 去掉光纤涂覆层, 用光纤熔接机把去掉涂覆层的光纤一端熔接 NKT 超连续谱光源, 另外一端熔接光谱分析仪, 然后用夹具把光纤固定在三维自动移动平台上;
- 3) 调节三维自动位移平台的 X 方向, 直到观察到拟刻蚀光纤在光栅刻蚀行程内在一条直线上, 调整好光纤的精确位置为止^[13]; 调节三维自动位移平台的 Y 、 Z 方向和显微物镜直到在 CCD 成像系统观察到激光聚焦点在光纤纤芯为止.
- 4) 开启激光器遮挡板, 调节飞秒激光器在脉冲状态运行; 开启长周期光纤光栅自动控制刻写软件, 按照光纤周期和长度设定好电动平移台的速度、曝光时间、占空比及位移, 点击光栅写按钮, 开始 LPFGs 的刻写, 同时观察光谱分析仪上透射谱的变化, 进行实验数据实时记录.

2 实验结果及分析

实验中通过控制光纤曝光时间、写制光栅周期个数、光栅占空比和激光脉冲能量等参数, 可以得到不同谐振峰深度和谐振峰波长的 LPFGs. 当控制光纤电动平移速度为 $25 \mu\text{m/s}$ 时, 分别改变刻写光栅周期个数、激光脉冲能量、光栅占空比等参数进行光栅刻蚀, 观察到的光栅透射谱最大损耗波长和带外损耗情况如图 3~5 所示.

2.1 光栅长度对 LPFGs 透射谱的影响

LPFGs 通过在光纤芯造成的折射率微扰, 导致前向传输的纤芯基模和同向包层模式之间的耦合形成透射光谱. 选取 LPFGs 周期为 $\Lambda=500 \mu\text{m}$, 光栅占空比 $D=0.4$ 时, 控制激光脉冲功率为 0.75 mW 不变, 此时单脉冲峰值功率密度为 23.2 TW/cm^2 , LPFGs 归一化透射谱随光栅周期数即光栅长度增加而生长的情况如图 3.

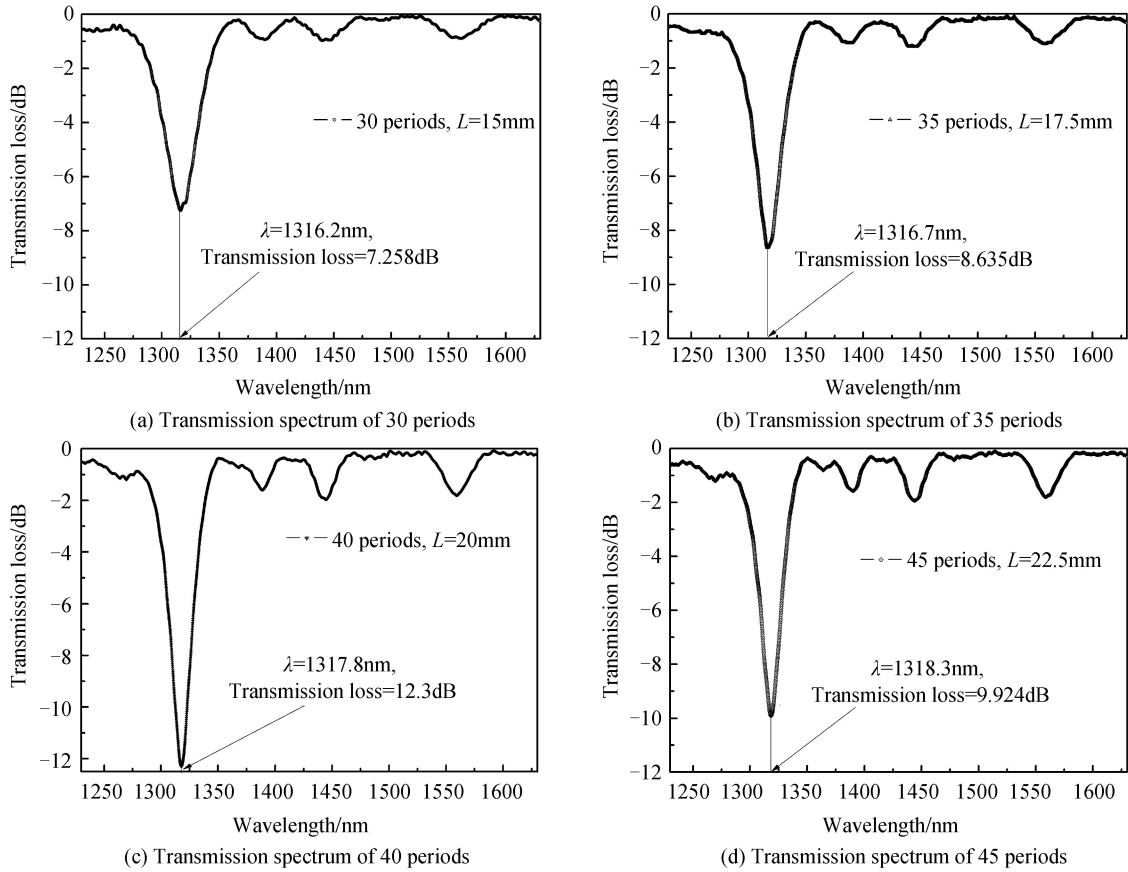


图3 LPFGs 归一化透射谱与光栅长度的关系 ($\Lambda=500 \mu\text{m}$, $D=0.4$)

Fig.3 The dependence of normalized transmission spectrum on length of grating for LPFGs with $\Lambda=500 \mu\text{m}$, $D=0.4$

实验结果发现,在光栅占空比不变的情况下,周期个数(光栅长度)太小,透射谱整体损耗增加,但并没有谐振峰出现^[14].随着周期数增加到大于15个周期时,透射谱谐振峰慢慢出现并逐渐加深,图3(a)~(d)分别给出了30、35、40、45个周期时,光栅透射谱谐振损耗峰随周期数增大的生长情况.可以看出,当光栅长度为40个周期时,在1200~1700 nm波长范围内观察到明显的谐振峰,最大谐振峰呈现在1320 nm处并随着光栅长度逐渐增加而增大,光栅长度为40个周期时,最大谐振峰值损耗为12.3 dB,带外损耗从波长1200 nm到1700 nm的范围内不足2 dB,呈现较小的带外损耗.随着光栅长度进一步增加(光栅刻写到45个周期)时,最大谐振损耗峰又开始减小,这是由于在光栅刻写过程中,包层模式与纤芯基模发生了耦合,当光栅周期由40增加到45时,包层模与纤芯基模的过耦合导致高阶谐振峰损耗很快过耦合而逐渐向低阶转移^[15],进而最大谐振峰损耗开始变弱.根据LPFGs的耦合模理论,谐振峰最大传输损耗满足函数关系^[16]

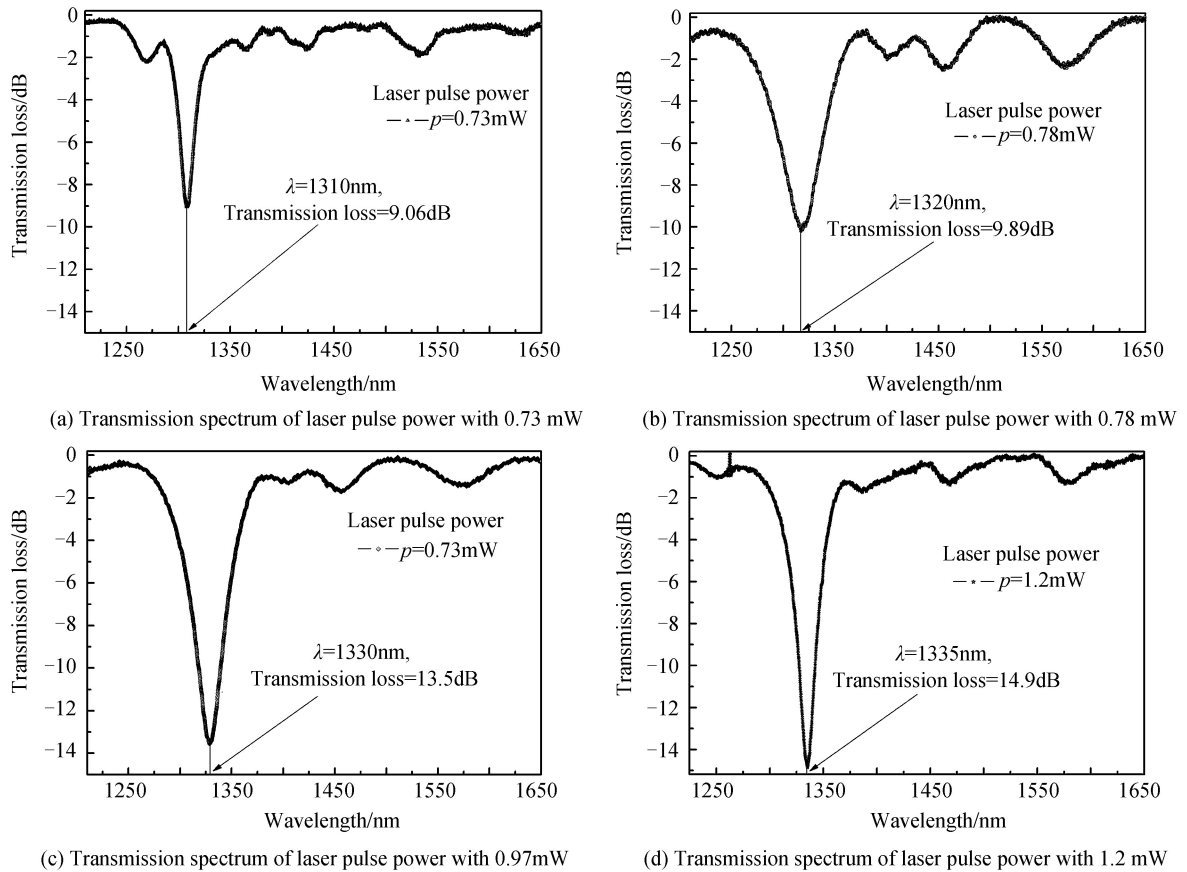
$$P_0 = \cos^2(kL) = \cos^2\left(\frac{\pi \overline{\delta n_{\text{eff}}}}{\lambda} L\right) \quad (1)$$

式中, k 是交叉耦合系数, L 是光栅长度, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 表示光栅每个周期的平均有效折射率调制, λ 是共振峰波长.由式(1)知谐振损耗峰强度是光栅长度的周期函数.因此,对于给定的光栅周期和占空比,要想在期望波长处获得高强度谐振峰的光栅,在光栅刻写过程中必须考虑到光栅长度的影响.

2.2 激光脉冲能量对LPFGs透射谱的影响

选取LPFGs周期为 $\Lambda=500 \mu\text{m}$,占空比 $D=0.4$ 不变,控制激光脉冲能量分别为0.73 mW、0.78 mW、0.97 mW和1.2 mW时,观察刻写30周期时,LPFGs归一化透射谱随激光脉冲能量的变化情况如图4.

从图4可以看出,在单模光纤的损伤阈值范围内,随着激光脉冲能量的增加,光栅的谐振峰损耗逐渐增加且最大谐振损耗峰逐渐红移.当激光脉冲功率取 $p=1.2 \text{ mW}$ 时,谐振峰损耗强度达到14.9 dB,透射光谱带外损耗较小.这是因为,随着激光脉冲能量的增加,光栅每个周期的平均有效折射率调制 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 会增大,交流交叉耦合系数 $k = \pi \overline{\delta n_{\text{eff}}} / \lambda$ 也会增加^[10],从而根据关系式(1)可知,谐振峰的强度会逐渐增加.另外,

图4 LPFGs 归一化透射谱随激光脉冲功率的变化关系 ($\Lambda=500 \mu\text{m}$, $D=0.4$)Fig.4 The dependence of normalized transmission spectrum on laser pulse power for LPFGs with $\Lambda=500 \mu\text{m}$, $D=0.4$

对于折射率调制主要发生在纤芯的均匀单模长周期光纤光栅,包层折射率调制很小,纤芯基模 LP_{01} 和一阶 m 次包层模 $LP_{0,m}$ 耦合的谐振波长可以近似表示为^[17]

$$\lambda_{\text{res}} = \left(1 + \frac{\overline{\delta n_{\text{eff}}}}{\Delta n_{\text{eff}}} \right) \Delta n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2)$$

所以,纤芯基模 LP_{01} 与一阶 m 次包层模 $LP_{0,m}$ 耦合的谐振波长会随激光脉冲能量的增加而向长波方向漂移,式中 Δn_{eff} 是纤芯基模和 m 次包层模的有效折射率差,如若进一步增大激光脉冲功率,将会导致包层模与纤芯基模的过耦合而致使高阶谐振峰逐渐向低阶转移,最大谐振峰损耗减弱.若激光脉冲功率增大到 $p=1.5 \text{ mW}$ 时,则会接近单模光纤的损伤阈值而烧坏光纤.

2.3 占空比对 LPFG 传输谱的影响

控制激光脉冲功率 $p=0.97 \text{ mW}$ 不变,选取 LPFGs 周期为 $\Lambda=500 \mu\text{m}$, 改变光栅刻写占空比从 0.4 到 0.5 时,观察刻写不同周期数,LPFGs 归一化透射谱的变化情况如图 5.

从图 5 可以看出,当光栅刻写占空比改变为 0.5 时,LPFGs 在波长 1 200~1 700 nm 范围谐振峰由单峰过渡为多峰,呈现 3 个明显的损耗峰且谐振峰整体发生红移,其中 2 个谐振损耗峰在通信 C 波段,1 个谐振损耗峰在 L 波段,谐振峰损耗强度随着光栅周期数的增加而增大.这是由于随着光栅周期数的增加即光栅长度的增加,模式间的耦合不断增强,LPFGs 损耗峰幅度逐渐增大,当光栅周期数为 70 即光栅长度为 35 mm 时,光栅发生过耦合,此时谐振损耗峰达到最大,C 波段两个最大谐振峰波长 1 538 nm 和 1 540 nm 处的损耗强度分别为 13 dB 和 15.9 dB,L 波段最大谐振峰在波长 1 625 nm 处,其损耗强度为 15dB.Y. W. Hu 等人^[16] 的研究发现,随着光栅占空比的降低(50%到 20%),LPFGs 的谐振峰个数会得到抑制,光栅的强度也同时变得很弱.因此,当占空比从 0.4 改变至 0.5 时,由于占空比增大,随着光纤纤芯折射率改变量的增加光纤光栅的谐振波长发生漂移并呈现多个谐振峰.理论分析也进一步表明^[17],当光栅占空比为 0.5 时,可以消除偶次谐波,而只存在奇次谐波,且基波振幅具有最大值^[18].基波与 3 次和 5 次谐波振幅之比近似为 15 :

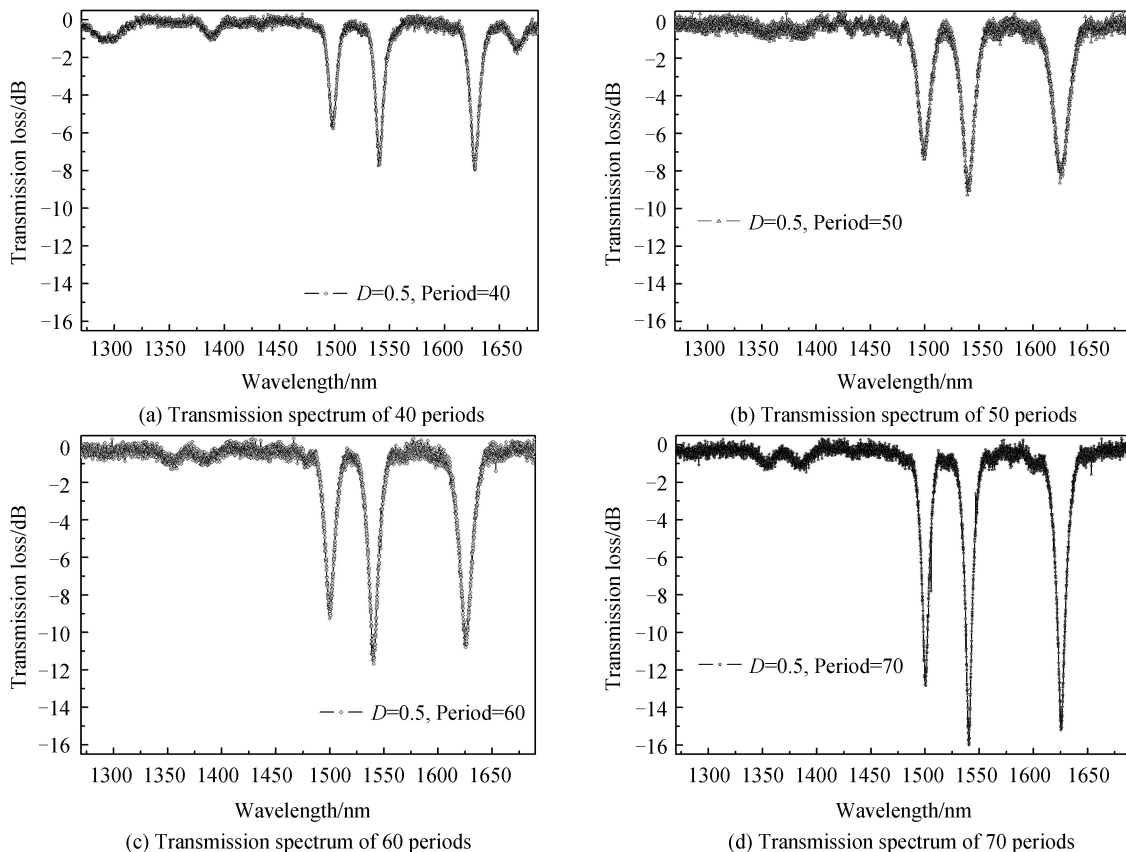


图5 LPFGs在占空比调整为 $D=0.5$ 的归一化透射谱($\Lambda=500\ \mu\text{m}$)

Fig.5 The normalized transmission spectrum of LPFGs with Duty Ratio $D=0.5$, $\Lambda=500\ \mu\text{m}$

5 : 3.因此可以把这些奇次谐波光栅看成是折射率调制非常弱的光栅;对于高次谐波其对应的光栅周期较短,且光栅谐振波长也较短,但光谱漂移速度较快.从而可以适当选择矩形波周期大小,使谐波光栅透射谱随着曝光量的增加逐渐漂移出所需要的范围,从而消除谐波光栅光谱的影响^[17].因此,光栅占空比为0.5时制作出的光纤光栅具有最好的光谱质量,该结果与理论分析吻合很好.另外,占空比的适当选择也可以更好地利用谐波光谱^[18].比如应用二阶或三阶谐波光栅,它们对应的包层模式次数一般较高,产生的光栅透射谱在受到外界扰动时,波长漂移方向和基波光栅所耦合的一阶低次包层模透射谱相反,因此可以利用设计合适的占空比这一规律使得谐振谱在C波段进行多参量传感^[19].

3 结论

设计了基于水平、垂直双CCD对准的飞秒激光LPFGs逐点刻写系统,在普通单模光纤内刻写了后向透射损耗低、谐振峰强度大、光谱平滑的长周期光纤光栅.探究了光栅刻写过程中的光栅周期、激光脉冲能量、光栅占空比等刻写参数对光栅生长机理和光谱特性的影响,实验得到了激光脉冲能量取 $p=1.2\ \text{mW}$ 、光栅占空比 $D=0.4$ 时,谐振峰强度达到14.9 dB、带外损耗较小的透射光谱;当光栅占空比改变为 $D=0.5$ 时,LPFGs在波长1200~1700 nm范围内呈现3个明显的损耗峰,其中C波段呈现2个损耗峰,L波段呈现1个损耗峰,且谐振峰强度随着光栅周期数的增加而增大的现象,最终获得了谐振波长在1550 nm附近、谐振峰强度达到15 dB、带外损耗不足2 dB、在3 dB衰减处带宽为15 nm谐振透射谱,这些实验结论的取得为LPFGs在压力、温度传感方面的应用奠定了良好基础^[19].

参考文献

- [1] 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.
- [2] VENGSARKAR A M, PEDRAZZANI J R, JUDKINS J B, *et al.* Long-period fiber grating basen gain equalizers[J]. *Optics Letter*, 1996, **21**(5): 336-338.
- [3] 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.
- [4] VENGSARKAR A M, LEMAIRE P J, JUDKINS J B, *et al.* Long period fiber gratings as band reject ion filters[J]. *Journal Light wave Technology*, 1996, **14**(1): 58 -65.
- [5] ALLSOP T, KALLI K, ZHOU K, LAI Y, *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.
- [6] KONDO Y, NOUCHI K, MITSUYU T, *et al.* Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(10): 646-648.
- [7] 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.
- [8] MARTINEZ A, KHRUSHCHEV I Y, BENNION I. Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femto-second laser[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(11): 1603-1605.
- [9] 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 Letters*, 2006, **23**(12): 3281-3284.
- [10] 张玲,飞秒写制长周期光纤光栅的光谱特征及传感应用[D]. 山东:山东大学,2012.
- [11] KONDO Y, NOUCHI K, MITSUYU T, *et al.* Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(10): 646-648.
- [12] 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, Technical Digest (CD) , 2004, THC6.
- [13] ALEXEY I K, DAVID N, GILBERTO B. Long-period fiber grating fabrication by high-intensity femtosecond pulses at 211 nm[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(8): 2568-2578.
- [14] 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.
- [15] RAO Yun-jiang, WANG Yi-ping, ZHU Tao. The principle and application of fiber Bragg grating[M]. 2006, Beijing: Science Press.
- 饶云江,王义平,朱涛.光纤光栅原理及应[M]. 2006, 北京:科学出版社.
- [16] HU Y W, SUNX Y, DUAN J A, *et al.* The effect of refractive index modification position and duty cycle on performance of LPFGs[A]. In: Photonics and Optic electronics (SOPO)[C], Wuhan, 2011:1-3.
- [17] ZHANG Guo-sheng, MA Ren-de, WANG Zheng-ping, *et al.* Theoretical analysis of the influence of duty cycle on the spectrum distribution of long period fiber gratings[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, **28**(11): 1296-1300.
- 张国生,马任德,王政平等,长周期光纤光栅占空比对其光谱影响的理论分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, **28**(11): 1296-1300.
- [18] STEPHEN A S, DAVID N N. Long-period fiber grating inscription under high intensity 352 nm femto-second irradiation: Three photo absorption and energy deposition in cladding[J]. *Optics Communications*, 2005, **255**: 81-90.
- [19] LI Chuan, ZHANG Yi-mo, ZHAO Yong-gui. Fiber grating: principle, technology and application[M]. 2005, Beijing: Science Press.
- 李川,张以谟,赵永贵.光纤光栅:原理、技术与传感应用[M]. 2005, 北京:科学出版社.