

文章编号: 1001-4322(2011)04-0934-05

# 基于飞秒激光直写光纤光栅的掺镱光纤激光器\*

朱学华, 潘玉寨

(哈尔滨工业大学(威海校区)光电科学系, 山东 威海 264209)

**摘 要:** 利用飞秒激光微加工技术,可以在光纤纤芯内直写出布拉格光栅,它与传统的光纤光栅制作方法相比,具有耗时短、无需光敏光纤、周期可任意设定、光栅稳定性高等优点。采用 800 nm 钛宝石飞秒激光器,在 Hi1060 光纤内写入一支 8 mm 长的布拉格光栅,光纤光栅的周期为 2.9  $\mu\text{m}$ ,这是中心波长为 1 042 nm 的八阶光纤布拉格光栅。将所得光栅与一段有源的双包层光纤熔接,作为激光输出镜,利用 975 nm 的 LD 光纤模块作为泵浦源,采用端泵浦技术构成双包层光纤激光器。双包层光纤采用 Nufern 公司镱( $\text{Yb}^{3+}$ )离子掺杂双包层光纤,光纤长度 3 m。所得激光器的输出功率为 71.1 W,中心波长 1 042 nm,带宽约为 0.8 nm。

**关键词:** 光纤光学; 飞秒激光; 微加工; 光纤布拉格光栅; 双包层光纤激光器

**中图分类号:** TN153 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20112304.0934

光纤激光器通常可以分为两类:一类是利用二向色镜及体光栅等作为波长选择元件的光纤激光器。这类系统具有较大的灵活性,它的缺陷在于结构复杂,造价高。另一类是采用光纤布拉格光栅作为选频元件的光纤激光器。光纤布拉格光栅具有很好的选频作用,能够实现窄带的激光输出,并且易于光纤集成,结构简单紧凑。传统的制作光纤布拉格光栅的方法主要有全息干涉法<sup>[1-3]</sup>和相位掩模板法<sup>[4-5]</sup>两种。近年来,利用飞秒光源,采用逐点刻写的方法在各种光纤内制作布拉格光栅用于光纤激光器和光纤传感等领域的研究成为热点<sup>[6-11]</sup>。2007 年,澳大利亚的 Jovanovic 等人利用 800 nm 飞秒激光直写方法在内包层为正六边形的掺镱双包层光纤内制作了长为 15 mm,周期为 1.12  $\mu\text{m}$ ,中心波长为 1 080 nm 的三阶光纤布拉格光栅,并以其作为激光输出镜制成了高功率连续波输出光纤激光器,输出功率为 5 W,中心波长 1 080 nm,输出线宽 15 pm<sup>[6]</sup>。2010 年,同一课题组的 R. J. Williams 等人采用同样的方法在掺镱双包层光纤内刻写了长为 30 mm 的对应于 1 536.5 nm 的三阶光栅,作为激光器的高反镜,并在普通通信光纤(Corning SMF-28)内制作了周期为 4.242  $\mu\text{m}$ ,长 30 mm 的八阶光纤光栅作为输出镜,实现了掺铒光纤激光器。并利用镱离子吸收泵浦光时产生的热量使两光栅中心波长发生偏离,通过周期性泵浦掺镱光纤实现了调 Q 的脉冲输出<sup>[10]</sup>。

本文采用飞秒激光直写的方法在 Hi1060 光纤内制作了 1 042 nm 的八阶光纤布拉格光栅,光栅周期为 2.9  $\mu\text{m}$ ,长度为 8 mm。并以其作为激光谐振腔的输出镜实现了激光输出,实验中测得的最大输出功率为 71.1 mW。

## 1 飞秒激光直写光纤光栅实验

### 1.1 实验装置

本文采用的飞秒激光直写光纤布拉格光栅的实验装置如图 1 所示,相干公司生产的钛宝石飞秒激光器输出的激光束通过衰减片来对其能量进行调节,以得到实验中所需要的最佳能量。飞秒激光的重复频率在 1~1 000 Hz 范围内可调。由计算机驱动的精密切门来控制加工过程中的曝光时间,以选择相应激光重复频率下的脉冲个数,快门的时间分辨力为 0.1 s。由快门选择出来的激光脉冲经过一个显微物镜精确地聚焦到光纤纤芯上,在聚焦焦斑范围内形成永久性的折射率调制。我们实验中所用的物镜倍率为 50,刻写光栅所采用的光纤为 Corning Hi1060 单模光纤,纤芯直径约为 6.3  $\mu\text{m}$ 。光纤固定在 3 维精密移动平台上,在计算机控制下沿光纤轴向作匀速运动,平台为 PRIOR ES103 3 维微动平台,移动的精度为 0.1  $\mu\text{m}$ 。当一个脉冲作用在纤芯上形成折射率调制以后,光纤沿轴向移动一定距离,接下来的一个脉冲继续作用,这样逐点曝光可以形成光栅。

\* 收稿日期:2010-07-13; 修订日期:2010-12-04

基金项目:哈尔滨工业大学科研创新基金项目(HIT.NSRIF.2009146);山东省自然科学基金项目(ZR2010FQ017)

作者简介:朱学华(1986—),男,主要从事飞秒制作光纤光栅技术及光纤激光器的研究;ahxhzh@163.com。

通信作者:潘玉寨(1976—),男,主要从事光纤激光技术及器件研究;panyzh2002@163.com。

在实验过程中可以通过调节相对于特定激光脉冲频率下的平台移动速度,对光栅周期(两曝光点间的距离)进行灵活选取。整个光纤光栅的制作过程通过一个 CCD 和监视器进行实时监测。飞秒激光与观察光同光路,通过高倍显微镜确定光束刻写位置。

实验中我们采用在线检测的方式刻写光栅,即在刻写的过程中利用光谱仪直接测量所刻光栅的反射谱。为此,利用由半导体激光器(LD)泵浦的掺镱光纤所发的荧光作为检测光源,经过一个 2×2 的 50:50 耦合器与移动平台上的 Hi1060 光纤熔接,耦合器的另外两段尾纤一段连接到光谱分析仪(HR4000),另一段浸没在折射率匹配液中。为了保证 LD 泵浦下掺镱光纤所发的光中没有放大的自发辐射(ASE)存在,泵浦功率不宜过高,在我们的实验中掺镱光纤的荧光光谱如图 2 所示,此时泵浦源的输出功率为 2 W。

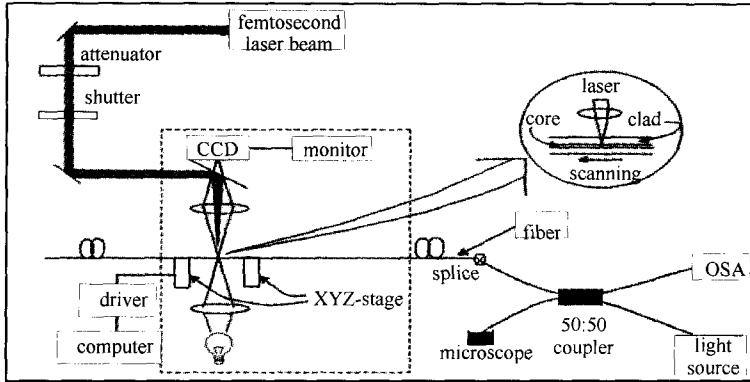


Fig. 1 Experiment setup of fiber Bragg grating(FBG) fabrication by focused irradiation of femtosecond laser pulses  
图1 飞秒激光直写光纤光栅的实验装置图

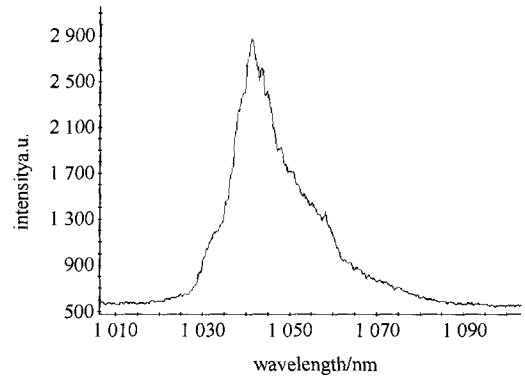


Fig. 2 Fluorescence spectrum of Yb-doped fiber pumped by laser diode(LD)  
图2 LD泵浦下掺镱光纤所发荧光光谱

### 1.2 光纤布拉格光栅的制作

由于光纤自身所固有的圆柱形结构,它可以被视为一个微型的柱透镜<sup>[11-12]</sup>,在光纤横截面方向上对入射到其上的经显微物镜聚焦后的光束具有二次聚焦作用,使得聚焦光斑呈现出长条形,如图 3 所示。此时实验中所采用的各部分参数如表 1 所示。图 3 所示的结构中,相邻两光斑间的距离为 5 μm,光斑几乎连在了一起,因而单个光斑的大小约为 5 μm。这种结构不能满足光纤布拉格光栅的结构要求。

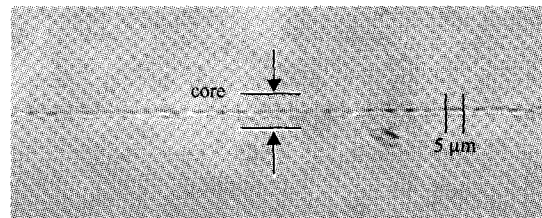


Fig. 3 Microscopic image of laser-induced spot under influence of cylindrical lens effect  
图3 光纤柱透镜效应影响下光斑的显微图像

表 1 实验参数

Table 1 Parameters used in experiment

femtosecond laser wavelength/nm	pulse repetition rate/Hz	single pulse energy/μJ	stage translation speed/(μm · s <sup>-1</sup> )
800	10	0.4	50

为解决这一问题,我们将光纤置于表面水平且与光纤包层折射率相同的折射率匹配液中,使光斑质量得到了改善。表 2 所示为引入折射率匹配液后的各实验参数。由于折射率匹配液会吸收部分激光能量,我们将单脉冲能量提高到 0.6 μJ。图 4(a)为沿写入方向观察的显微图像。在我们的实验中缺少精密的光纤夹持工具,光纤与平台运动方向很难保持完全一致,若制作较长的光栅,聚焦后的飞秒光斑很容易从纤芯偏出,我们制作的光栅长度为 8 mm。图 4(b)为沿垂直于写入方向观察到的光栅结构,从图中可以看出光斑准确写入纤芯内,另外由于经显微物镜聚焦到纤芯上的激光能量较强而产生了复杂的非线性效应,沿光栅的写入方向上出现了多个点的结构(图 4(b)中的小插图所示)。

表 2 引入折射率匹配液后各实验参数

Table 2 Experiment parameters when refractive index matching oil was used

femtosecond laser wavelength/nm	pulse repetition rate/Hz	single pulse energy/μJ	stage translation speed/(μm · s <sup>-1</sup> )
800	10	0.6	29

根据布拉格公式  $2n_{eff}\Lambda = m\lambda_B$ , 设计了在各阶光纤光栅,其中:  $n_{eff}$  为相应模式在纤芯内的有效折射率;  $\Lambda$  为

光栅周期;  $\lambda_B$  为布拉格波长;  $m$  为光栅阶数。因为实验室现有的掺镱双包层光纤长度只有 3 m, 我们设计布拉格光栅中心波长在光纤的增益峰附近(参见图 2), 以便后期将其作为激光输出镜构成最佳的谐振腔。由于实验条件的限制, 飞秒脉冲聚焦到光纤纤芯产生的折射率调制区域面积仍然稍大(直径在  $2\ \mu\text{m}$  左右), 若制作低阶光栅则相邻光斑相互重叠而导致光栅无法形成。为此, 我们选择制作光栅周期为  $2.9\ \mu\text{m}$ , 中心波长为  $1\ 042\ \text{nm}$  的八阶光栅。平台移动的精度为  $0.1\ \mu\text{m}$ , 可以保证光栅周期的精度要求。

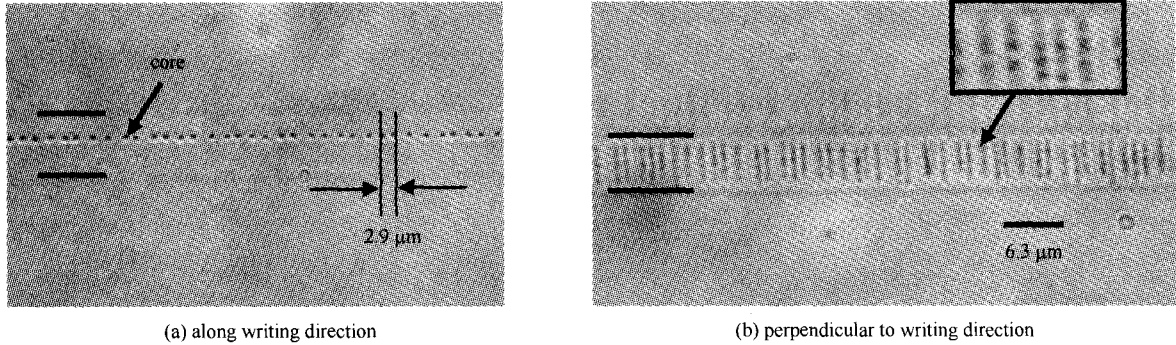


Fig. 4 Microscopic images of eight-order FBG  
图 4 八阶光纤布拉格光栅的显微图像

如图 5 所示为我们实验中所监测到的光栅反射谱演化情况。未刻写光栅时, 光谱仪中没有明显反射峰存在, 如图 5(a) 所示。启动平台控制程序, 平台开始沿光纤轴向运动。当光栅长度增大到 0.8 mm 时, 光谱仪中  $1\ 042\ \text{nm}$  处开始出现反射峰, 如图 5(b) 所示; 平台继续移动, 光栅长度增长到 3 mm 时, 反射峰有所增强, 如图 5(c) 所示; 当光栅长度增大到 8 mm 时, 光谱峰值达到一个更高的高度, 如图 5(d) 所示。经估算, 中心波长处的反射率约为 10%。从图 4 中显微图像中可以看出, 沿光栅写入方向和垂直于写入方向上观察, 光斑的均匀性不太好, 这是造成飞秒激光直写的光纤光栅的反射率不高的重要原因。飞秒激光直写的光纤光栅与全息干涉法和相位掩模法相比均匀性较差, 这是由于全息干涉法和相位掩模法是通过两束光的干涉场对光纤曝光得到的, 光栅的折射率调制分布与干涉条纹相同, 因此具有很好的均匀性; 而飞秒激光直写方法中光斑的均

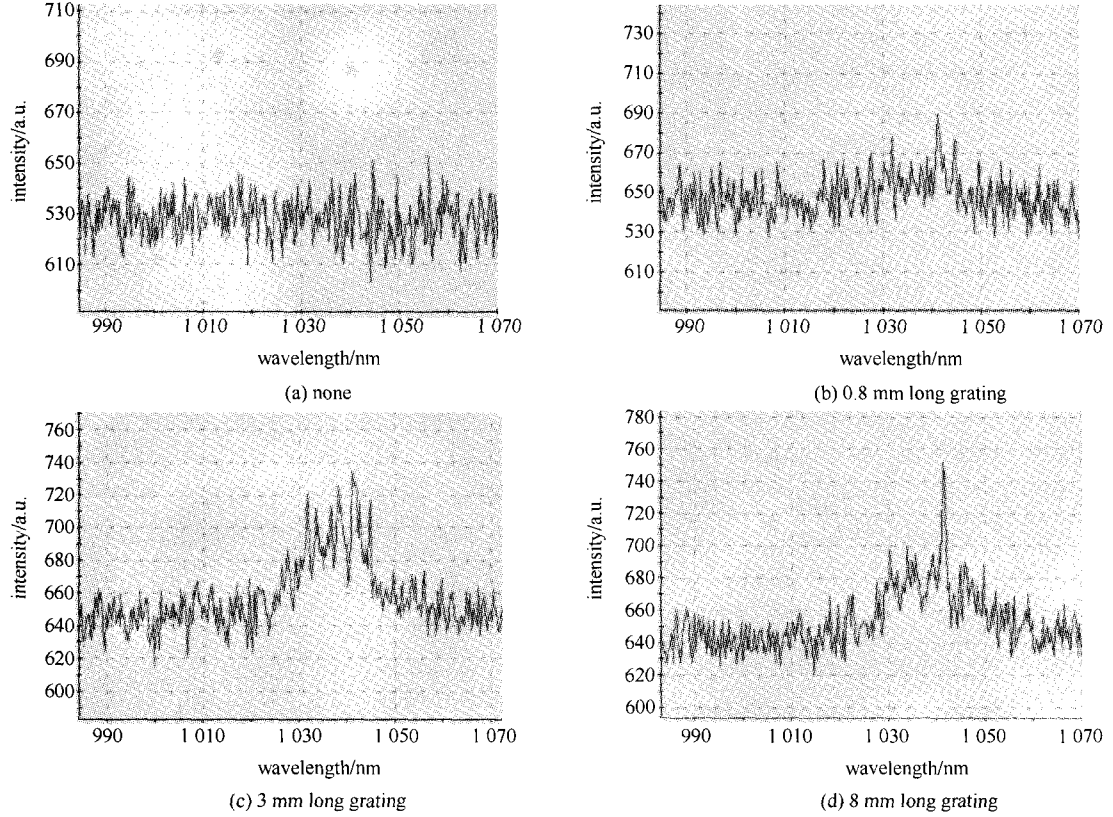


Fig. 5 Evolution of grating spectrum during writing process  
图 5 刻写过程中光栅反射谱的演化

匀性直接由移动平台移动的精度和激光器脉冲重复的均匀性决定,因此其均匀性相对较差。在今后的研究中应注重提高飞秒激光直写光栅光斑的均匀性,以得到高质量的光纤光栅。

### 2 光纤激光器实验

在得到光纤布拉格光栅以后,我们将其作为输出镜构成了全光纤化的光纤激光器,实验装置如图 6 所示。泵浦源采用深圳众望达光电有限公司提供的 980 nm 半导体激光器,最大输出功率为 10 W。增益光纤为 Nufern 公司提供的掺镱双包层光纤,纤芯直径为 10 μm,内包层直径 125 μm,光纤长度为 3 m。泵浦源输出光纤与一个光纤集成的 980/1060 二相色镜(泵浦保护器)相连接。泵浦保护器输入端为与泵浦源尾纤相同的多模光纤,可以与尾纤进行高效熔接;输出端是一段无源的双包层光纤,与掺镱双包层光纤同结构,这种结构是我们为匹配实验条件所特别定制的,可以与各段光纤进行高效熔接,降低了连接损耗。实验中测得泵浦保护器的耦合效率为 69.63%。掺镱的双包层光纤一端与泵浦保护器的输出端熔接,另一端与刻有八阶光纤布拉格光栅的 Hi1060 光纤熔接,构成激光器谐振腔。输出端通过二向色镜将所产生的激光与剩余泵浦光分离,以消除其对激光测量的影响。

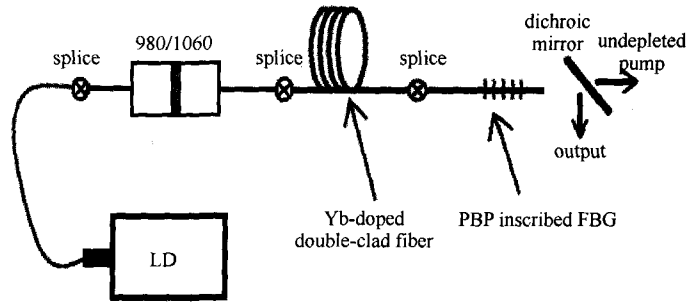


Fig. 6 Schematic diagram of all fiber laser

图 6 全光纤化光纤激光器示意图

实验中对激光输出特性进行了测量,测得的激光输出光谱如图 7 所示。由于实验室尚无光纤衰减器,我们的激光光谱是通过空间传输衰减测得的,光纤激光器输出端与光谱仪探测光纤输入端的距离约为 12 cm。从实验光谱中可以看出,激光的中心波长为 1 042 nm,由于实验室光谱分析仪的分辨率较低(0.5 nm),激光带宽从光谱中估读为 0.8 nm,若要得到更加精确的带宽值,则需要借助于高分辨率的光谱仪。这与我们前期采用飞秒激光直写的光纤布拉格光栅的中心波长一致。进一步证实了光纤布拉格光栅的存在。

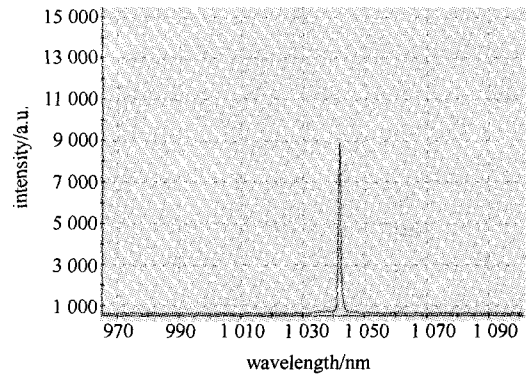


Fig. 7 Spectrum of fiber grating laser

图 7 光纤光栅激光器输出光谱

为了突显所刻光纤布拉格光栅对光纤激光器输出特性的影响,我们还测量了利用抛光的光纤端面作为输出镜的光纤激光器的输出光谱,端面反射率为 4%(菲涅耳反射),并与光纤光栅激光器输出光谱相比较,如图 8 所示。从图中看出,由端面反射做输出镜时激光的中心波长为 1 054 nm,并且稳定性较差,会出现跳模现象。而用光栅作输出镜时激光的中心波长在 1 042 nm,这正是实验中光纤布拉格光栅中心波长的位置。

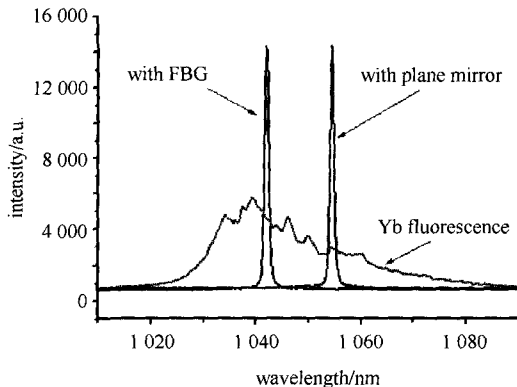


Fig. 8 Comparison between fiber grating laser and fiber laser with mirror

图 8 光纤光栅激光器与反射镜激光器比较

随后,我们测量了双包层光纤激光器的输出功率与输入泵浦功率的关系,如图 9 所示,图中方形黑点为实验中测得的功率值,直线为采用 Origin8 软件对实验数据进行拟合的结果。其中泵浦功率为 1.5 W 时,光纤激

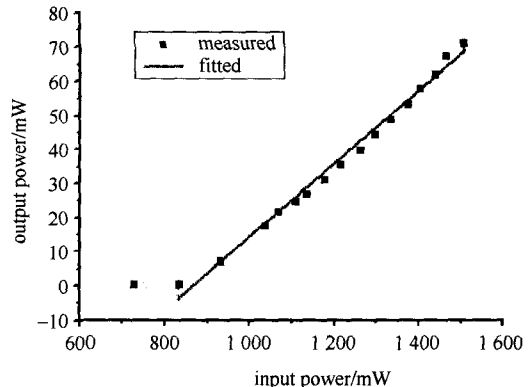


Fig. 9 Relationship between output power and input power of fiber grating laser

图 9 光纤激光器输入输出关系

光器的输出功率为 71.1 mW。从以上结果可以看出,激光器的斜效率偏低,主要原因可能是激光谐振腔的损耗过大引起的。实验中掺镱光纤纤芯直径 10  $\mu\text{m}$ ,而 Hi1060 光纤的纤芯直径为 6.3  $\mu\text{m}$ ,两种光纤直接连接在一起会产生很大的熔接损耗,有源光纤中传输的光有 60.31% 将被损耗掉。另一方面,所得到的光栅反射率较小,造成较大的输出损耗。

### 3 结 论

本文讨论了飞秒激光直写光纤光栅过程中光纤圆柱形结构对光束聚焦的影响,并运用折射率匹配液成功消除了这一影响,改善了聚焦光斑的质量。运用在线监测的方法制作了中心波长为 1 042 nm 的八阶光纤布拉格光栅,光栅周期为 2.9  $\mu\text{m}$ ,光栅长度为 8 mm。以此光栅作为输出镜得到了 1 042 nm 的光纤激光输出,进一步证实了光纤布拉格光栅的存在,实验中得到的最大输出功率为 71.1 mW,光谱带宽约为 0.8 nm。实验结果表明:光纤自身的圆柱形结构是影响飞秒激光直写光纤光栅过程中聚集光斑质量的重要因素,借助于折射率匹配液可以消除这一影响;利用这种方法可以制作八阶光纤布拉格光栅,并可以将其作为光纤激光器的输出镜实现连续激光输出,实验显示光栅特性良好。

#### 参考文献:

- [1] Kurkov A S, Gruk D A, Medurdkov O I, et al. Multimode fiber lasers based on Bragg gratings and double-clad Yb-doped fibers[J]. *Laser Phys Lett*, 2004, **1**(9):473-475.
- [2] Wang Y P, Bartelt H, Becker M, et al. Fiber Bragg grating inscription in pure-silica and Ge-doped photonic crystal fibers[J]. *Appl Opt*, 2009, **48**(11):1963-1968.
- [3] Becker M, Bergmann J, Bruckner S, et al. Fiber Bragg grating inscription with DUV femtosecond exposure and two beam interference[C]// *Proc of SPIE*. 2009; **73862Y**.
- [4] Mihailov S J, Grobnic D, Smelser C W, et al. Through-the-jacket inscription of fiber Bragg gratings using femtosecond infrared radiation for sensor applications[C]// *Proc of SPIE*. 2009; **73160B**.
- [5] Bernier M, Vallee R, Morasse B, et al. Ytterbium fiber laser based on first-order fiber Bragg gratings written with 400 nm femtosecond pulses and a phase mask[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(21):18887-18893.
- [6] Jovanovic N, Fuerbach A, Marshall G D, et al. Stable high-power continuous wave Yb<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser utilizing a point-by-point inscribed fiber Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(11):1486-1488.
- [7] Martinez A, Khrushchev I Y, Bennion I. Thermal properties of fiber Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser[J]. *Electron Lett*, 2005, **41**(4):176-177.
- [8] Kalli K, Geernaert T, Koutsides C, et al. Point-by-point Bragg grating inscription in single-mode microstructure fiber using NIR femtosecond laser[C]// *Proc of SPIE*. 2009; **75037O**.
- [9] Geernaert T, Kalli K, Koutsides C, et al. Point-by-point fiber Bragg grating inscription in free-standing step-index and photonic crystal fibers using near-IR femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(10):1647-1649.
- [10] Williams R J, Jovanovic N, Marshall G D, et al. All-optical, actively Q-switched fiber laser[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(8):7714-7723.
- [11] Lai Y, Zhou K, Sugden K, et al. Point-by-point inscription of first-order fiber Bragg grating for C-band application[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(26):18318-18325.
- [12] Lai Y, Zhou K, Zhang L, et al. Microchannels in conventional single-mode fibers[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(17):2559-2561.

## Ytterbium fiber laser based on fiber Bragg grating inscribed point-by-point with femtosecond laser

Zhu Xuehua, Pan Yuzhai

(Department of Optoelectronics Science, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

**Abstract:** A fiber Bragg grating (FBG) was inscribed into Corning Hi1060 fiber by focused irradiation of 800 nm femtosecond laser pulses. The FBG was 8 mm long with the period of 2.9  $\mu\text{m}$ , which corresponds to an eight-order grating for 1 042 nm. As the output coupling mirror, the FBG was spliced to a 3 m long double-clad fiber to form the cavity of a fiber laser. A 975 nm laser diode fiber module was used as the end-pump light source. The double-clad fiber was provided by Nufern, with the core and cladding diameters of 10  $\mu\text{m}$  and 125  $\mu\text{m}$ , respectively. The laser output power was 71.1 mW in our experiment, and the center wavelength was 1 042 nm, with the bandwidth of 0.8 nm.

**Key words:** fiber optics; femtosecond laser; micromachining; fiber Bragg gratings; double-clad fiber lasers