

文章编号: 0258-7025(2010)09-2395-05

双包层光纤光栅的制备及其高功率光纤激光实验研究

范元媛^{1,2} 周 军¹ 何 兵¹ 顾锡嘉³ 薛宇豪^{1,2} 李 震^{1,2} 魏运荣¹ 董景星¹ 楼祺洪¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 瑞尔森大学电气与计算机工程系, 加拿大 M5B2K3)

摘要 以 248 nm 的 KeF 准分子激光器为光源, 基于相位掩模法, 研究了大模场面积双包层光纤(LMA-DCF)光栅的刻写技术。在 20/400 μm 的 LMA-DCF 中制备出中心波长 1076.11 nm, 基模反射率大于 99.9%, 3 dB 带宽 0.32 nm 的光纤布拉格光栅(FBG)。用已制备的 FBG 作为腔镜, 采用分立的光学元件后向抽运掺 Yb³⁺ 光纤激光器, 实现了 144 W 的稳定激光输出, 斜率效率为 60%, 输出激光光谱特性同 FBG 的光谱特性一致。

关键词 光纤光栅; 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器; 高功率; 相位掩模法

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2395

Preparation and High-Power Fiber Laser Experimentation of Double-Clad Fiber Grating

Fan Yuanyuan^{1,2} Zhou Jun¹ He Bing¹ Gu Xijia³ Xue Yuhao^{1,2}
Li Zhen^{1,2} Wei Yunrong¹ Dong Jingxing¹ Lou Qihong¹

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Department of Electrical and Computer Engineering, Ryerson University, Canada M5B2K3

Abstract Using a 248 nm KeF excimer laser as the UV light source, the inscription method of fiber Bragg grating (FBG) on large-mode-area double-clad fiber (LMA-DCF) was studied with phase mask technique. The center wavelength of the fabricated FBG was at 1076.11 nm with a 3 dB bandwidth of 0.32 nm and reflectivity of 99.9% in the fundamental mode. The FBG was then applied to a Yb³⁺-doped double-clad fiber laser as a highly reflective cavity mirror. The 144 W of stable output power with a slope efficiency of 60% was achieved. The spectral characteristics of the output laser matched well with that of the FBG and an excellent Gaussian beam shape was achieved.

Key words fiber grating; Yb³⁺-doped double-clad fiber laser; high-power; phase-mask method

1 引 言

采用大模场面积双包层光纤(LMA-DCF)和包层抽运技术,可大幅度提高能量转换效率和输出功率,并能有效地抑制各种非线性效应,已成为发展高功率激光器的重要途径之一。而制备合适的光学谐振腔是研制高功率光纤激光器的一项核心内容。光纤光

栅作为一种低损耗全光纤器件,可用作光纤激光器谐振腔的反射端面^[1],获得窄线宽稳定的激光输出,并且便于与其他器件连接制成全光纤系统,具有体积小、波长选择好、频谱特性丰富和便于使用、维护和封装等优点,其应用领域日益广泛^[2,3]。1989年 G. Meltz 等^[4]首次成功利用 244 nm 紫外激光形成干涉

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-05-13

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)、国家自然科学基金(609080112, 60907045)、上海市科技启明星计划(09QB1401700)和中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划资助课题。

作者简介: 范元媛(1984—),女,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: yuan840101@gmail.com

导师简介: 周 军(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

条纹对光纤进行侧面横向曝光,使光纤纤芯形成折射率调制继而制成了光纤光栅,自此之后,各类横向写入法刻写光纤光栅的技术开始受到人们的广泛关注^[5~7]。目前报道的作为腔镜的光纤布拉格光栅(FBG)大多在单包层光纤上制成,从而在与双包层增益光纤(如掺 Er^{3+} , Yb^{3+} 等)熔接时会引入很大损耗^[8,9]。考虑到 FBG 的功率承载能力,即使直接在双包层光纤上刻写 FBG,大多数激光运行功率也较低^[10,11]。可见,在 LMA-DCF 上刻写高质量的 FBG,对实现高功率全光纤激光器尤为重要。

本文基于相位掩模法,在 LMA-DCF 中刻写了具有高反射率和窄带宽的 FBG,并利用其作为掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的谐振腔高反腔镜,进行了一系列高功率光纤激光实验研究。

2 双包层光纤中 FBG 的制备

与普通单模光纤 FBG 的制备相比,双包层光纤光栅的制备技术基本相同,但由于双包层光纤的芯径比常规单模光纤的芯径大得多,因此,在对双包层光纤进行载氢增敏时,所需的时间更长,且由于芯径增大,对聚焦光学系统的要求也有所不同。此外,由于光纤参数不匹配,常规的 FBG 测量系统也不再直接适用。

实验中,选用 Nufern 公司生产的掺镱光敏 LMA-DCF 进行 FBG 的制备,该光纤的内包层为圆形,纤芯和包层的直径分别为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径分别为 0.06 和 0.46。FBG 的制作流程如图 1 所示,包括:1)对 LMA-DCF 进行载氢;2)用化学试剂彻底去除 LMA-DCF 的涂覆层;3)将相位掩模板放置于 LMA-DCF 上,利用 $248\ \text{nm}$ 波长的 KrF 准分子紫外激光照射,运用计算机控制平移台实现动态刻写 FBG;4)刻写完成后再利用低折射率聚合物对 FBG 进行涂敷,以保持其内包层数值孔径不变。其中第 1 步是能否写入 FBG 的基础,第 3 步是 FBG 制备的核心,需要对过程进行精确控制。所用相位掩模板的周期为 $740\ \text{nm}$,准分子激光器发出的激光脉冲能量为 $200\sim 360\ \text{mJ}$,未经调制的光束截面为 $1\ \text{cm}\times 3\ \text{cm}$ 。由于准分子激光本身的光束不均匀,对其进行选取、扩束后,再利用柱透镜聚焦,焦点处的光斑直径为 $8\ \mu\text{m}$ 左右,取焦点后光斑直径约 $20\ \mu\text{m}$ 处进行 FBG 的刻写以便准确覆盖纤芯位置。为了避免传统均匀 FBG 两端折射率突变所引起的法布里-珀罗(Fabry-Perot)效应,利用切趾技

术及折射率补偿方法,通过精确控制光斑能量和曝光时间对光纤纤芯折射率进行正弦状调制,调制幅度在 10^{-4} 级别,FBG 刻写区域约为 $10\ \text{mm}$ 。

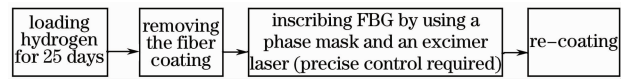


图 1 相位掩模法制作 FBG 的流程

Fig. 1 Process flow chart for fabricating an FBG with the phase mask method

所制作的 FBG 的透射和反射光谱如图 2 所示。测量时,采用两个模场匹配器来滤除 $20/400\ \mu\text{m}$ 光纤中的 LP_{11} 等高阶模,以保证测得的是 LP_{01} 基模的光谱。所制备 FBG 的反射中心波长为 $1076.11\ \text{nm}$,对此波段的基模反射率大于 99% , $3\ \text{dB}$ 带宽为 $0.32\ \text{nm}$ 。

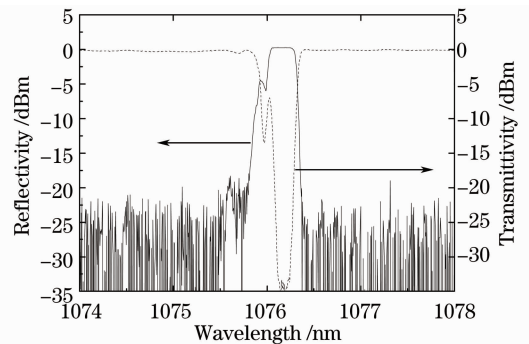


图 2 大模场面积光纤光栅的反射与透射谱线

Fig. 2 Reflection and transmission spectra of large-mode-area fiber grating

3 FBG 用于高功率光纤激光器的实验研究

3.1 实验装置

为了测试和检验所制备的 LMA-DCF 中 FBG 的性能,建立了基于分立光学元件单端后向抽运的光纤激光器实验装置如图 3 所示。采用尾纤输出的中心波长在 $975\ \text{nm}$ 的半导体激光器(LD)作为抽运源,抽运光经非球面透镜 L_1 准直,再经两个二向色镜(D_1 和 D_2)反射和一个二向色镜(D_3)透射后,经非球面透镜 L_2 后注入到掺 Yb^{3+} 双包层光纤。光纤的抽运光注入端垂直切割处理以提供 4% 的菲涅耳反射,并作为光纤激光器的输出端,产生的激光由 D_3 反射输出。掺镜光纤(YDF)的右端与所制备的反射率为 99.9% 的双包层光纤 FBG 进行熔接,作为光纤激光器的后腔镜,将起到选择决定激光中心波长和限制光谱宽度的作用。

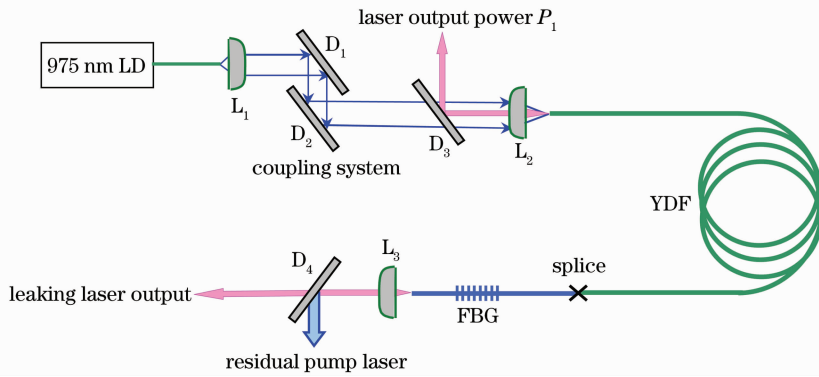


图 3 大模场面积 FBG 作为后腔镜的双包层光纤激光器实验装置图

Fig. 3 Schematic of double-clad fiber laser using LMA FBG as the cavity mirror

所选用的二向色镜 D_1 和 D_2 对抽运光具有高的反射率,对激射激光具有高的透射率; D_3 对抽运光具有高的透射率,并对激射激光具有高的反射率,二向色镜用于将抽运光与输出激光分开,以避免激射激光入射到抽运源。用作激光增益介质的掺 Yb^{3+} 双包层光纤 (Nufern 公司) 长度约为 15 m,内包层为八角形,直径 $400 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.46,纤芯直径 $20 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.06,975 nm 处包层吸收系数为 1.7 dB/m。二向色镜 D_4 对抽运光高反射,对产生激光高透射,从而可将剩余抽运光与泄漏激光进行分离。

3.2 实验结果与讨论

采用图 3 装置,对所制备的 FBG 在高功率下的工作和输出特性进行了实验研究。掺 Yb^{3+} 双包层光纤的缠绕半径为 15 cm,在抽运功率约为 2 W 时,即获得了激光输出,增大抽运功率,输出激光功率 P_1 随之增加,图 4 给出了 P_1 随吸收的抽运光功率(耦合进光纤的抽运光功率与剩余抽运光功率之差)的变化曲线,在光纤吸收的抽运功率约为 246 W 时,该光纤激光器的 P_1 为 144 W,光-光转换效率为 58.5%,斜率效率为 60%。由图 4 可见,输出激光功率与吸收抽运光功率呈良好的线性关系,并未出现饱和现象,这表明对于以所制备的 FBG 为腔镜的光纤激光器来说,通过继续增大抽运光功率,可实现更高功率的激光输出。在实验中由于抽运源的中心波长偏离 975 nm 较远,使得该光纤激光器的转换效率稍低。从图 4 也可以看出,随着抽运功率的提高,该光纤激光器的斜率效率有所增加,这是由于 LD 抽运源的工作波长随驱动电流的增加逐渐接近 Yb^{3+} 的 975 nm 的吸收峰,从而使得掺 Yb^{3+} 双包层光纤对抽运光的吸收增大而引起的。

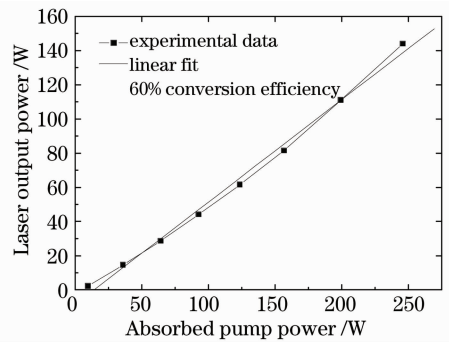


图 4 输出激光功率 P_1 与吸收的抽运光功率之间的关系曲线

Fig. 4 Output laser power P_1 versus absorbed pump power

在该光纤激光器处于最高输出功率时,测量了输出激光的光谱,如图 5 所示,激光的中心波长(λ_c)为 1076.45 nm,3 dB 带宽为 0.36 nm,可见输出激光光谱特性同 FBG 的光谱特性符合很好。在通常的以镀膜镜片作为谐振腔镜的高功率光纤激光器中,输出激光的光谱较宽且中心波长不能精确控制^[12,13],限制了这类光纤激光器在倍频等方面的应用。以所制备的双包层 FBG 为腔镜的高功率光纤

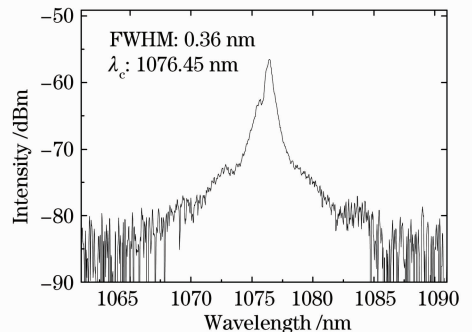


图 5 最高输出功率时的激光光谱曲线

Fig. 5 Spectra under the highest power

激光器,在高功率运转时依然可以起到选择和决定激光中心波长与光谱带宽的作用,且实现了腔镜和有源工作介质的全光纤化,可靠性和稳定性大大提高。实验中,该高功率双包层光纤激光器运行 258 min,在 FBG 和有源光纤均未采取特殊温控和冷却措施的情况下,工作性能稳定。

实验中,测量了高反 FBG 光纤端的输出特性,发现存在一定的激光泄漏现象,泄漏激光的光谱特性与图 5 完全一样,说明其确为该光纤激光器振荡产生的激光。这种高反 FBG 光纤端所存在的激光泄漏,除了使得整个光纤激光器的效率降低,更重要的是非常不利于全光纤化高功率光纤激光器的实现。造成这种激光泄漏的主要原因之一可能是由于 FBG 圆形内包层光纤与掺 Yb^{3+} 的八角形内包层光纤熔接时纤芯没有完全对准引起的。由于两种光纤内包层形状并不相同,且光纤制作时的误差会导致纤芯并不一定在光纤的中心,而光纤熔接时是基于包层对准技术而进行熔接的,因此,不能保证两种双包层光纤的纤芯完全对准,从而导致纤芯中传输的激光会有泄漏^[14]。另一方面,即使熔接时做到了纤芯完全对准,由于双包层光纤的制作工艺复杂,两种不同光纤纤芯数值孔径的微小偏差也会导致两种光纤的纤芯对激光的限制能力有所不同,从而产生激光泄漏。在不同抽运功率时,测量了由 FBG 光纤端泄漏的激光功率 P_2 ,如图 6 所示。随着吸收抽运功率的提高,此值逐渐增大,但斜率效率下降。这主要是因为未对该光纤激光器进行专门的冷却温控,有源光纤和 FBG 均直接置于空气中,所以随着抽运功率的增加,增益光纤的温度稍有升高,从而使得光纤折射率发生微小变化,继而导致数值孔径产生变化。

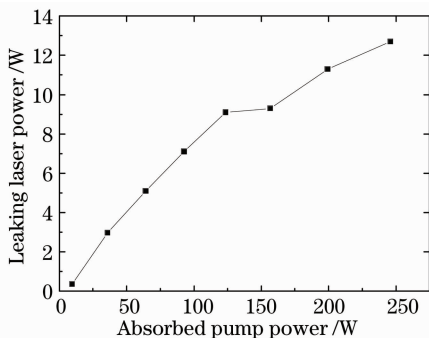


图 6 泄漏激光功率 P_2 与吸收的抽运光功率之间的关系曲线

Fig. 6 Leaking laser power P_2 versus absorbed pump power

4 结 论

采用相位掩模法在掺锗光敏 LMA-DCF 上制备了 FBG,其中心波长为 1076.11 nm,3 dB 带宽为 0.32 nm,基模反射率大于 99.9%。利用分立光学元件后向抽运掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器,对所制备的 FBG 进行了一系列高功率激光实验研究。在吸收抽运功率 246 W 时,输出激光功率为 144 W,光-光转换效率为 58.5%,总的斜率效率为 60%。最高功率时输出激光光谱中心波长为 1076.45 nm,3 dB 带宽为 0.36 nm。输出激光光谱与 FBG 反射光谱符合得很好,表明该 FBG 具有决定激光光谱中心波长及限制光谱带宽的作用。该光纤激光器稳定运行了 258 min,说明 FBG 承载高功率长时间稳定运行的能力较强。最后分析了该光纤激光器所存在的高反 FBG 端出现激光泄漏的原因。实验中掺杂光纤长度选为 15 m,仍有残留抽运光,如果适当增加光纤长度或纤芯掺杂浓度,使抽运光被充分吸收,有望进一步提高输出激光功率。

参 考 文 献

- Li Jian, Liu Peng, Wang Jing *et al.*. Experiment study on a tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1047~1050
李 坚, 刘 鹏, 王 静 等. 以环形器和光纤光栅为腔镜的可调谐窄线宽激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1047~1050
- Kuo Li, Zhen'an Zhou, Aichun Liu. A high sensitive fiber Bragg grating cryogenic temperature sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 121~123
- Yongqing Lei, Jue Wei, Xiaofeng Xu *et al.*. Analysis of sampled fiber Bragg gratings in polarization-maintaining fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 479~482
- G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn. Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~825
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- Wang Yuezhu, Wang Wei, Zhang Yunjun *et al.*. Theory analysis of fiber grating production using infrared femtosecond[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2978~2982
王月珠, 王 巍, 张云军 等. 近红外飞秒脉冲激光制作光纤光栅的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2978~2982
- Ning Ding, Li Zhaohui, Su Hongxin *et al.*. Wavelength selecting by fiber grating of Yb^{3+} doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 965~968
宁 鼎, 李朝辉, 苏红新 等. 光纤光栅选频掺 Yb^{3+} 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 965~968
- T. Weber, W. Luthy, H. P. Weber *et al.*. A longitudinal and side-pumped single transverse mode double-clad fiber with a special silicone coating [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**(1): 99~104
- Li Lijun, Fan Wangde, Fu Shenggui *et al.*. Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg

- grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 55~58
- 李丽君, 范万德, 付圣贵等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 55~58
- 11 Pan Yuzhai, Zhang Jun, Hu Guijun *et al.*. High-power ytterbium-doped fiber laser based on fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1237~1239
- 潘玉寨, 张 军, 胡贵军等. 利用光纤光栅的高功率掺镱光纤激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1237~1239
- 12 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- 周 军, 楼祺洪, 朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- 13 楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1277
- 14 Shupeng Yin, Ping Yan, Mali Gong. End-pumped 300 W continuous-wave ytterbium-doped all-fiber laser with master oscillator multi-stage power amplifiers configuration [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17864~17869