

文章编号: 0253-2239(2005)01-55-4

双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器*

李丽君 范万德 付圣贵 王志 张强 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 双包层光纤激光器中多采用法布里-珀罗(F-P)线形腔结构,谐振腔为一只二向色镜和光纤端面菲涅耳反射镜(反射率约为 4%)构成,这属于一种有缺陷的腔结构,其稳定性不好,产生激光的波长很难得到有效控制,后腔镜不能精确选择激光器的输出波长,激光器的输出谱线较宽。在某些对激光波长有明确要求的应用中,该结构会受到限制。采用布拉格光纤光栅作腔镜,利用其窄带滤波特性,可以得到窄线宽的激光输出,目前报道的作为腔镜的布拉格光纤光栅为在单包层光敏光纤上制作而成,然后分别将不同反射率的光纤光栅与双包层增益光纤熔接,这给腔镜与双包层光纤之间带来很大的耦合损耗,影响了激光器的功率输出。该文报道了用相位掩模法在双包层光纤芯上写入了布拉格光纤光栅,并把此光纤光栅做为后腔镜,对长度为 10 m、20 m 的 D 形掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器进行实验研究,在 1058 nm 附近得到稳定的窄线宽激光输出,3 dB 带宽为 0.329 nm。激光器最大输出功率为 570 mW。最后对实验结果进行了理论分析。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 双包层光纤; 掺 Yb³⁺; 选频; 窄线宽

中图分类号: TN248

文献标识码: A

Yb³⁺-Doped Double-Clad Fiber Laser with Frequency Selecting by Double-Clad Fiber Bragg Grating

Li Lijun Fan Wande Fu Shenggui Wang Zhi Zhang Qiang

Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: It is always using F-P linearity cavity in double-clad fiber lasers. The cavity is composed of one dichroic mirror and fiber end Fresnel reflector (reflectivity nearly 4%). This is a defect and unstable cavity. It cannot exactly select frequency, and the linewidth of the laser is extensive. In some applications requiring wavelength strictly, this kind of laser is limited. As a rule Bragg gratings that compose a laser cavity are fabricated in a high germanosilicate host fiber and then spliced with an Yb³⁺-doped active fiber. Difference of parameters of the two kinds of fibers leads to additional losses of both pump and signal. A double-clad fiber Bragg grating which was fabricated in the core of Yb³⁺-doped double-clad fiber using the phase-mask method is reported. This kind of grating is used as the output mirror of the D-shape inner cladding Yb³⁺-doped double-clad fiber laser, the fiber length is 10 m and 20 m respectively. The laser operating near 1058 nm with stable and narrow-FWHM (3 dB bandwidth is 0.329 nm) is realized. The maximum output power laser is 570 mW. Finally, these experimental results are analyzed theoretically.

Key words: lasers; fiber laser; double-clad fiber; Yb³⁺-doping; frequency-selecting; narrow line-width

1 引 言

近年来,高功率的双包层光纤激光器获得了突飞猛进的发展,包层抽运技术的应用,使得高功率光

纤激光器呈现出一片光明的前景。掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器,由于 Yb³⁺ 特有的能级结构,使其具有量子效率高、增益带宽大以及无激发态吸收、无浓度猝灭等优点^[1~4],并可以采用波长 915 nm 或 976 nm

* 国家自然科学基金(60137010)资助课题。

作者简介:李丽君(1970~),南开大学现代光学研究所在读博士,主要从事双包层光纤激光器级放大器方面的研究。
E-mail: nankailj@163.com。

收稿日期:2003-10-27;收到修改稿日期:2004-03-23

附近的多模大功率激光二极管(LD)抽运,在1060 nm波段获得斜率效率高达80%以上的激光输出,在宽达100 nm以上的波段连续调谐,这些特点引起了人们广泛的研究兴趣^[5,6]。由于双包层光纤的波分复用器和3 dB耦合器等非常规器件的制造难度很大,所以目前在双包层光纤激光器中多采用法布里-珀罗(F-P)线形腔结构,谐振腔由一只二向色镜和光纤端面菲涅耳反射镜(反射率约为4%)构成。该结构通常也能获得较高的单端效率。但这属于一种有缺陷的腔结构,其动力学特性及稳定性不好。由于受到增益光纤的掺杂浓度、长度等因素的影响,产生激光的波长很难得到有效控制,后腔镜不能精确选择激光器的输出波长,激光器的输出谱线较宽^[7,8]。在某些对激光波长有明确要求的应用中,该结构会受到限制。采用布拉格光纤光栅作腔镜,利用其窄带滤波特性,可以得到窄线宽的激光输出,并且通过光栅的调谐得到输出波长的调谐^[8],但目前报道的作为腔镜的布拉格光纤光栅为在单包层光敏光纤上制作而成,然后分别将不同反射率的光纤光栅与双包层增益光纤熔接^[5,9],这给腔镜与双包层光纤之间带来很大的耦合损耗,影响了激光器的功率输出。我们利用相位掩模技术,直接在双包层光纤上写入布拉格光栅,虽然受双包层器件等多种因素限制,我们没能直接观察到光栅的反射谱,但通过实验和理论的分析,说明了双包层布拉格光纤光栅的存在。

2 实验与结果

首先,我们用相位掩模技术,在未载氢的D形内包层双包层光纤(DCF)上写光栅。紫外光源为德国KrF准分子激光器,输出波长为248 nm,典型的能量为每个脉冲100 mJ。相位模板的周期为724.86 nm,曝光长度为15 mm。由于光纤没有载氢,所以光栅的反射率很低,没能直接观察到反射峰。

把这种光纤光栅作为双包层光纤激光器的输出腔镜,来验证光栅的存在。其实验装置如图1所示,由多模激光二极管抽运源发出的抽运光,经过由透镜组构成的耦合系统,输入到二向色镜 M_1 ,二向色镜与双包层光纤输入端紧密相连,抽运光注入增益光纤中,我们制作的双包层光纤光栅 M_2 为后腔镜,和 M_1 共同构成法布里-珀罗腔。用光谱仪测量输出光谱(波长最小分辨力为0.1 nm)。

抽运光源是由中国科学院海特公司制作的光纤

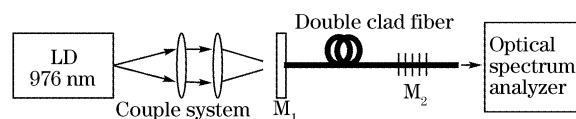


图1 双包层布拉格光纤光栅作为后腔镜双包层光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of double-clad fiber Bragg grating as the output mirror of Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser 输出10 W的激光二极管,中心波长为976 nm,输出光斑直径700 μm ,数值孔径为0.20。前腔镜 M_1 对976 nm抽运光的透过率为85%,对1020~1100 nm波段激光的反射率为99.9%。双包层光纤激光器的增益光纤是由信息产业部第46研究所光纤部和南开大学共同研制的D形内包层形状的掺 Yb^{3+} 双包层光纤,其截面形状如图2所示。D形掺 Yb^{3+} 双包层光纤参量:纤芯直径为10 μm ,数值孔径为0.36,内包层直径400 μm ,直边260 μm 。

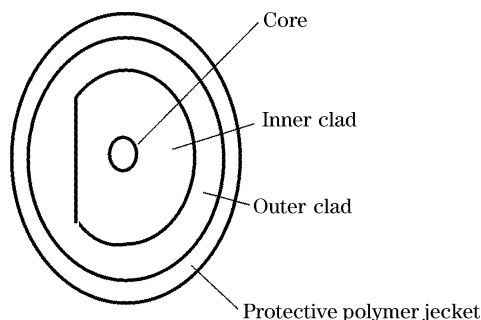


图2 D形内包层掺 Tb^{3+} 双包层光纤截面图

Fig. 2 Schematic diagram of the D-shape inner cladding double-clad fiber

实验中,分别用长度为10 m和20 m的D形双包层光纤为激光器的增益介质,激光输出经过衰减器后,由Q8383光谱仪测量和记录输出光谱,发现两个激光器输出激光的中心波长都在1058 nm附近,3 dB带宽很窄,分别为0.437 nm和0.329 nm均小于0.5 nm。激光输出的稳定性很好,信噪比约为35 dB。图3、图4分别给出了10 m和20 m光纤激光器的光谱,图5为激光稳定性测量谱。用功率计测量激光器的输出功率,当入纤功率为2.8 W时,分别测得20 m和10 m长光纤激光器的最大输出功率为570 mW和365 mW。两个激光器的抽运功率阈值分别为421 mW和506 mW,斜率效率分别为24%和16%。造成这些差异的原因主要是由于较长的光纤有利于对抽运光的吸收。为了防止后端面的反射,我们把双包层光纤的后端面磨成15°倾角。实验中随着入纤功率的增加,输出光谱的中心波长稳

定。对于几瓦到十几瓦的中等输出功率双包层光纤激光器,由于双包层光纤的结构优势,光纤内的热效应对光栅及激光的输出等特性基本没有影响^[2,10]。

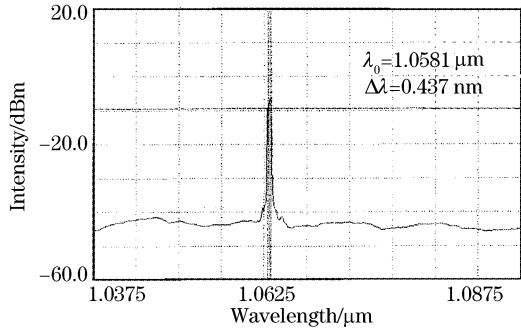


图3 D形单光纤光栅 10 m 长掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器输出激光光谱

Fig. 3 Spectrum of the output laser with the 10 m length of DCF laser

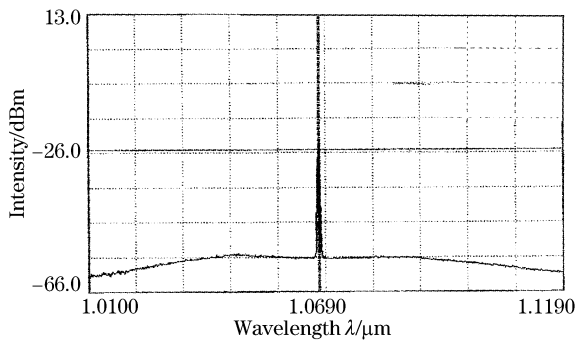


图4 D形单光纤光栅 20 m 长掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器输出激光光谱

Fig. 4 Spectrum of the output laser with the 20 m length of DCF laser

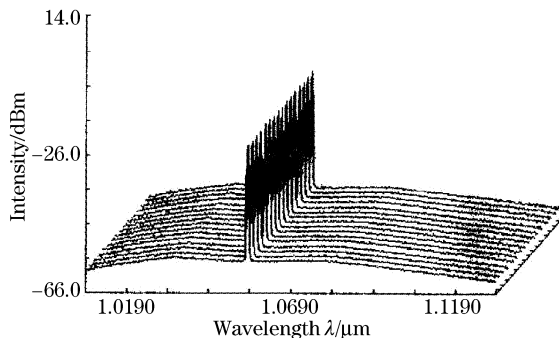


图5 D形单光纤光栅掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光输出光谱稳定性测量

Fig. 5 Stable characteristics of the D-shape Yb³⁺-doped DCF laser

3 分 析

在以前的工作中^[5],掺 Yb³⁺ 双包层线形腔激光

器普遍采用二向色镜或光纤的端面作后腔镜。因此激光的半峰全宽(FWHM)较宽,通常高于 3 nm,我们使用了一个反射率低的双包层光纤布拉格光栅作为后腔镜,利用其窄带滤波器特性来选频。所以,只有以光纤布拉格光栅中心波长为中心、极窄的波长范围内的受激辐射光才能得到反馈,形成激光。我们所使用的相位掩模板的周期为 $\Lambda = 724.86$ nm, D形内包层双包层光纤芯的有效折射率为 1.459,所以双包层光纤中的布拉格中心波长为 $n_{\text{eff}} \Lambda \approx 1058$ nm,与实验结果符合的很好,实验中两个激光器输出激光波长的微小差异,是由于写光栅时的条件不可能完全一致造成的。

理论和实验验证^[7,11],在掺 Yb³⁺ 光纤激光器中,激光的输出波长随掺杂浓度和光纤长度的变化而变化,其表达式如下:

$$1 + \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{ul} - hc\lambda^{-1}}{kT}\right) = \exp\left\{LN_i\sigma_{ap} - \ln\left[\frac{\sigma_{ap}}{\sigma_{ep} + \sigma_{ap}} - \frac{I(0)_p}{I_c}\right] - \frac{I(0)_p}{I_c}\right\},$$

其中 Z_l 和 Z_u 分别为激光上下两能级的配分函数, E_{ul} 为激光上下能级因斯塔克分裂而成的两能级族中最低能级之差, k 为玻耳兹曼常量, T 为温度, h 为普朗克常量, c 为光速, λ 为波长, L 为光纤长度, σ_{ep} 和 σ_{ap} 分别为抽运波长的吸收和辐射截面, I_c 为饱和光强, N_i 为腔内总粒子数密度。由上式可知,当掺杂浓度 N_i 一定时,光纤长度 L 的增大将使激光输出向长波移动,变化率为 0.41 nm/m^[9]。

在实验中我们采用的 10 m 和 20 m D形内包层双包层光纤来源于同一根光纤,掺杂浓度相同。所以根据上面的公式,如果在输出端没有双包层布拉格光纤光栅做为腔镜,就不会有相同波长输出。另外,对光纤掺杂浓度、长度等进行优化可以提高激光输出功率、斜率效率等。结合双包层光纤的结构还需要对光栅写入条件进行优化,以期获得需要的光纤光栅参量。随着光输出功率的提高,热效应等对光栅的影响还有待进一步的实验研究。

4 结 论

成功地制成了双包层布拉格光纤光栅,并应用它作为双包层光纤激光器的输出腔镜,得到了在 1058 nm 处稳定的窄线宽激光输出,3 dB 带宽为 0.329 nm。可见双包层布拉格光纤光栅显著改善了激光器的光谱性能,能够获得预期波长的激光,提高了激光器的工作稳定性和可靠性,一定程度上实现

了光纤和谐振腔的一体化,无需光学校准,减小了激光器的体积,使得双包层光纤激光器更加实用。以上结果是在未对耦合系统和前腔镜等做优化的条件下得到的,仍需进一步深入的实验研究,使激光输出功率等性能获得提高。

参 考 文 献

- 1 Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~1056
- 2 Luis Zenteno. High-power double-clad fiber lasers [J]. *J. Lightwave of Technol.*, 1993, **11**(9): 1435~1446
- 3 Li Yigang, Liu Weiwei, Fu Chengpeng *et al.*. High power Yb-doped double-cladding superfluorescent source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1171~1173 (in Chinese)
李乙钢,刘伟伟,傅成鹏等. 大功率掺 Yb 双包层宽带超荧光光源[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1171~1173
- 4 Lou Qihong, Zhou Jun, Wang Zhijiang *et al.*. 50-watt ytterbium-doped double-clad fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 559~560
- 5 Ning Ding, Li Zhaohui, Dong Xiaoyi *et al.*. Wavelength selecting by fiber grating of Yb³⁺ doped fiber laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 965~968 (in Chinese)
宁 鼎,黄榜才,董孝义等. 光纤光栅选频掺 Yb³⁺ 光纤激光器[J]. *中国激光*, **A29**(11): 965~968
- 6 Ball G A, Glenn W H. Design of single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(10): 1338~1343
- 7 Ning Ding, Huang Bangcai, Dong Xiaoyi *et al.*. Effect of back-cavity mirror on Yb³⁺ double clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 313~316 (in Chinese)
宁 鼎,黄榜才,董孝义等. 后腔镜对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器性能影响的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 313~316
- 8 Liu A, Song J, Kamatani K *et al.*. Rectangular double clad fiber laser with two end bundled pump[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(18): 1673~1674
- 9 Weber T, Luthy W, Weber H P *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
- 10 Su Hongxin, Lu Kecheng, Yan Peiguang *et al.*. DBR Yb-doped double-clad fiber laser operating at 1.06 μm [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4914**: 426~429
- 11 Chen Bai, Chen Lanrong, Lin Zunqi *et al.*. Selecting lasing wavelength by varying fiber length[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(12): 1061~1065 (in Chinese)
陈 柏,陈兰荣,林尊琪等. 运用波长与光纤长度关系选择激光波长[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(12): 1061~1065