

光纤光栅选频掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器^{*}

付圣贵 范万德 张 强 王 志 李丽君 张春书 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

(2004 年 1 月 14 日收到 2004 年 6 月 8 日收到修改稿)

利用相位掩模法, 在 D 形内包层掺 Yb^{3+} 双包层光纤一端直接写出 Bragg 光栅, 用作双包层光纤激光器的输出腔镜. 试验得到了线宽为 0.196 nm, 波长为 1058.2 nm, 最高输出功率为 570 mW 的稳定激光输出, 解决了激光器中模式竞争造成的输出不稳定现象. 从速率方程出发, 对激光器的输出功率与抽运功率、光栅反射率的关系以及最佳光纤长度进行了理论分析, 结果与实验符合很好.

关键词: 双包层光纤光栅, 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 相位掩模, 速率方程

PACC: 4281W, 4280S

1. 引言

双包层光纤激光器由于其高输出功率、高转换效率、高集成度和极好的光束质量等优点而受到广泛的重视. 它在光通信、材料加工、航天航空、印刷以及医疗等方面具有重大的应用价值^[1]. 双包层光纤激光器于 20 世纪 80 年代后期出现, 发展的步伐非常快, 目前商业产品已达到了千瓦以上, 并有不断攀高的趋势. 双包层光纤激光器产生的高功率激光可以在光纤中产生一系列非线性效应, 如受激拉曼散射、受激布里渊散射、双光子吸收等. 这些非线性效应成为拓宽目前激光输出波长的有效途径, 如光纤拉曼激光器与放大器的抽运, 光纤上转换激光器等都广泛应用了包层抽运技术^[2,3]. 利用调 Q 和锁模技术, 双包层光纤激光器可以输出脉冲宽度在飞秒量级、平均功率数瓦的超短脉冲激光, 对光时分复用/波分复用技术、非线性光学、瞬态光学等前沿课题, 具有非常重要的应用价值^[4,5].

双包层光纤激光器的谐振腔一般采用 F-P 腔结构, 目前国内普遍采用二向色镜作为激光器的腔镜. 这种结构由于缺乏有效的选频机制, 输出的激光线宽较宽, 并且腔内的空间烧孔效应导致激光模式竞争现象, 严重影响激光器的输出特性. 利用光纤光栅作为激光器的反馈与选频腔镜, 可以得到稳定的窄

线宽激光输出, 而且激光器具有更为紧凑、简单的结构, 有更高的稳定性以及可调谐性^[6,7]. 这对双包层光纤激光器的研制与应用具有重要的意义.

我们利用相位掩模法直接在一段长度为 20 m, 内包层形状为 D 形的掺 Yb^{3+} 双包层光纤的一端写制了 Bragg 光栅, 作为激光器的输出腔镜, 结果得到了线宽为 0.196 nm, 波长 1058.2 nm 稳定的激光输出. 输出激光的信噪比达到 40 dB, 在入纤功率为 2.7 W 时, 得到了 570 mW 的输出功率. 根据我们的激光器结构, 建立了合适的速率方程, 分析了激光波长和光纤光栅的反射率对输出功率的影响, 以及不同波长激光与最佳光纤长度的关系, 对试验的优化与设计具有重要的指导意义.

2. 实验装置

我们利用相位掩模法进行双包层光纤光栅的写制. 所用光源为 KrF 激光器, 输出波长为 248 nm, 实验用掺 Yb^{3+} 双包层光纤内包层为 D 形, 内包层直径为 400 μm , 弦边为 260 μm , 数值孔径为 0.36, Yb 离子掺杂浓度为 0.2% (重量比). 在光栅的写制时, 考虑到双包层光纤的截面尺寸比较大, 脉冲能量应适当加大. 理论与试验表明^[8], 双包层光纤激光器的后腔镜具有较低的反射率时, 有利于得到高功率的激光输出. 因此, 为了得到具有低反射率的光纤光栅, 我

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60137010)和国家高技术研究发展计划(批准号 2003AA312100)资助的课题.

们没有对双包层光纤进行增敏措施,通过合理控制写制激光脉冲的能量和曝光时间,最终得到了低反射率光纤光栅(本实验得到光栅反射率约为 15%)。

图 1 为利用写制了光栅的掺 Yb³⁺ 双包层光纤作为增益介质的激光器装置图,抽运源为尾纤输出大功率激光二极管,通过温控装置可将激光中心波长稳定在 976 nm。从尾纤输出的抽运光通过一耦合

透镜组聚焦到双包层光纤端面,在紧贴光纤端面处放置一个二向色镜(对 976 nm 激光高透射、对 1020—1100 nm 波段激光高反射)作为激光器的前腔镜。为了消除光纤输出端面的菲涅耳反射对激光振荡带来的干扰,将光纤输出端面磨成 15°左右倾角。试验中,在光纤激光器的输出端利用光谱仪和功率计观察激光光谱和测量输出功率。

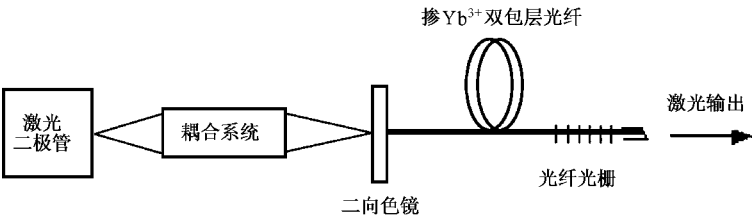


图 1 光纤光栅选频掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器装置图

3. 试验结果

为了便于比较写制的光栅对激光器性能带来的影响,我们利用一段 20 m 长的双包层光纤在写制光栅前后都进行了激光试验。没有写制 Bragg 光栅时,直接利用双包层光纤的垂直端面作为输出腔镜,测得不同抽运功率下激光器的输出功率和激光谱图。然后将增益光纤取下,用上述介绍的方法在输出端写制 Bragg 光栅。写制光栅的位置尽量接近输出端面,以保证两次试验中增益光纤的长度尽量保持一致。写制光栅后,在同等试验条件下进行激光器的试验,测试输出激光光谱和输出功率。

使用不同空间的激活粒子而同时产生振荡,从而产生纵模的空间模式竞争。由于缺乏有效的选频机制,同时有多个模式被激发,在光谱上连在一块形成一个宽带的激光输出,并且输出激光波长有跳变现象。对这种腔结构,试验中观察到,基本都在光纤放大自发辐射谱(ASE)的中心波长附近(即 1085 nm 附近)产生激光振荡。此时在入纤抽运功率为 2.7 W 时,得到了 729 mW 激光输出。

图 3 为增益光纤输出端写制了光栅作为输出腔镜后的试验结果。可以看出,经过光栅的选频作用,激光器的光谱特性大为改善。激光输出波长为 1058.2 nm,3 dB 线宽为 0.196 nm。激光的信噪抑制比高达 40 dB。图 4 是我们每间隔 1 min 对其激光输出多次测量的结果。从图 4 可以看出,输出激光光谱的稳定性非常高,几乎不产生抖动,这是利用光栅作为输出腔镜的一个显著优点。

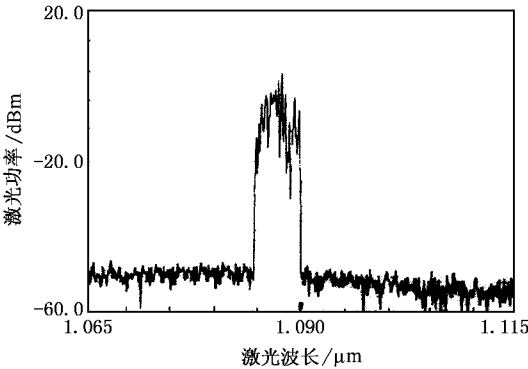


图 2 光纤后端面作为后腔镜输出激光谱图

图 2 为没有写制光栅的双包层光纤作为增益介质的激光器输出光谱。对这种激光腔结构,腔内的驻波场会引起增益的空间烧孔效应,不同的纵模可以

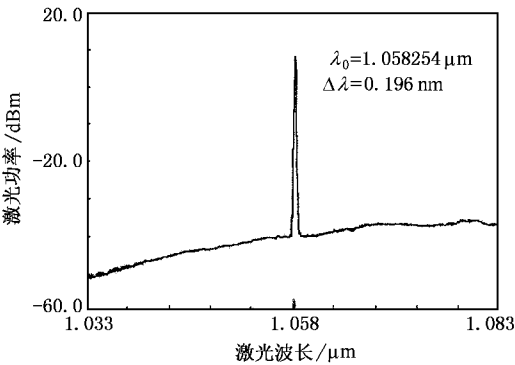


图 3 双包层光纤光栅作为后腔镜输出激光谱图

最初进行实验时,光纤输出端的端面没有经过

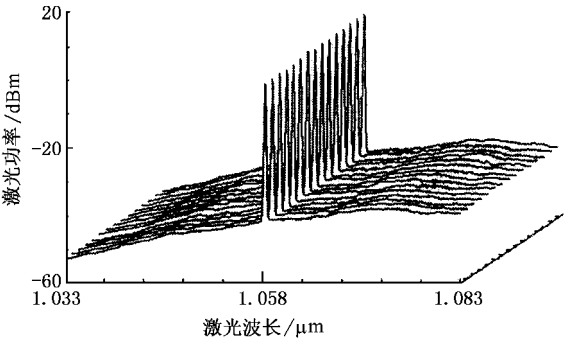


图 4 光栅选频双包层光纤激光器输出稳定性谱图

处理 随抽运功率升高首先出现了波长为 1058.2 nm 的激光振荡 ,即位于我们写入的光栅反射峰处 ,继续增大抽运功率 ,当到达一定值时 ,在 1085 nm 附近也出现了激光输出 ,这是由于光纤端面的菲涅耳反射形成的激光振荡输出 ,激光波长位于光纤的增益谱的最高处 ,并且随着出现模式竞争现象 .后来把光纤输出端面处理为 15°左右的倾角 ,消除了端面反射带来的干扰 ,激光器只剩下 1058.2 nm 单一波长激光输出 .光栅选频双包层激光器的抽运阈值为 490 mW 随着抽运功率的提高输出激光功率也随之升高 ,在抽运功率为 2.7 W 时 ,得到了 570 mW 的输出功率 .图 5 为光纤激光器的输出功率随抽运功率的变化曲线 ,激光器的斜率效率为 24% .造成激光器斜率效率较低的主要原因是前腔镜的反射率不够高 ,以及在对光纤后端面处理工艺不够完善造成的 .

我们还对一段 10 m 长的与上述试验用的光纤同时拉制的掺 Yb^{3+} 双包层光纤进行了同样的试验 .没有写入光栅时 ,由于增益光纤的长度缩短 ,激光输出波长向短波方向移动 ,得到的激光输出波长在 1065 nm 附近 ,同样存在严重的模式竞争现象 .写入光栅后进行激光试验 ,得到的输出波长为 1058.0

nm 3 dB 线宽为 0.141 nm .与 20 m 长光纤试验得到 1058.2 nm 波长激光相比 ,可以认为是光栅写入环境不完全相同造成的细微差别 .

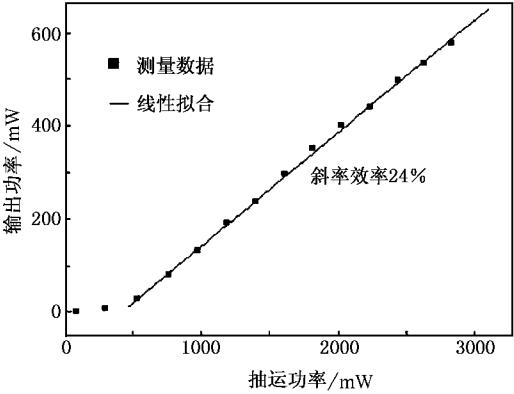


图 5 光栅选频双包层光纤激光器斜率效率曲线

为了检验在掺 Yb^{3+} 双包层光纤上写入光栅的时间稳定性 ,我们在间隔三个月后重新进行了试验 ,结果并没有观察到光栅的退化现象 ,证明光栅具有良好的稳定性 .

4. 理论分析

图 6 为我们实验采用的谐振腔结构的双包层光纤激光器理论分析示意图 ,激光器前腔镜为二向色镜 (对抽运光高透 ,对激光高反) ,抽运光从此处耦合入纤 ,在光纤的后端写入了 Bragg 光栅同时作为反馈元件和选频元件 . $P_s^{\pm}(z)$ 表示激光腔内沿正反两个方向传播的激光功率的分布函数 , $P_p(z)$ 表示沿光纤正向传播的抽运功率 , L 为激光器腔长 , $P_p(0), P_p(L), P_s^+(0), P_s^+(L)$ 分别为抽运光和激光在两个边界处的功率 . $R_1(\lambda), R_2(\lambda)$ 分别为前后腔镜的反射率 .

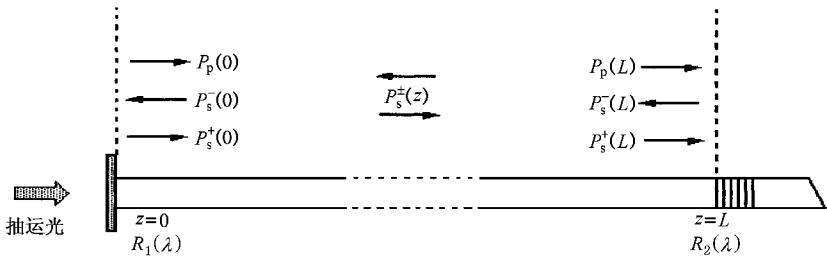


图 6 光栅选频双包层光纤激光器理论分析示意图

对于高功率光纤激光器, Kelson 等^[9]建立的速率方程可以适用于三能级系统和四能级系统. 对于我们的系统, 由于光纤光栅反射峰的线宽很窄, 我们在建立速率方程时直接取光栅反射峰的中心波长 λ_s 为激光波长, 而不考虑反射谱的形状. 为了消除端面反馈对激光器的影响, 我们把光纤后端面磨成 15° 倾角, 腔内只存在前向的抽运光而不存在后向的抽运光. 在考虑到激光腔的各种因素之后, 其静态速率方程可表述为

$$\frac{N_2(z)}{N} = \left\{ \frac{P_p(z) \sigma_{ap} \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{\Gamma_s \sigma_{as} [P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h\nu_s A} \right\} \times \left\{ \frac{P_p(z) (\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es}) [P_s^+(z) + P_s^-(z)]}{h\nu_s A} \right\}^{-1} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p(z)}{dz} = \{ \Gamma_p [(\sigma_{ap} + \sigma_{ep}) N_2(z) - \sigma_{ap} N] - \alpha_p \} P_p(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^{\pm}(z)}{dz} = \{ \Gamma_s [(\sigma_{as} + \sigma_{es}) N_2(z) - \sigma_{as} N] - \alpha_s \} P_s^{\pm}(z), \quad (3)$$

式中, N_2 为激光上能级粒子数密度; τ 为上能级粒子的荧光寿命; N 为 Yb 离子的掺杂浓度; σ_{ap} , σ_{as} , σ_{ep} , σ_{es} 分别表示抽运光和激光的吸收截面和发射截面; A 是双包层光纤纤芯面积; Γ_p , Γ_s 为抽运光和激光的功率填充因子; $h\nu_p$ 和 $h\nu_s$ 为抽运光和激光的光子能量; α_p , α_s 分别为抽运光和激光在腔内的耗散性损耗. 利用边界条件 $P_s^+(0) = R_1 \cdot P_s^-(0)$, $P_s^-(L) = R_2 \cdot P_s^+(L)$, 便可以对激光器的输出特性进行分析.

图 7 为光纤光栅的反射率对激光输出功率的影响模拟曲线. 由图 7 可以看出, 后腔镜的反射率存在一个最佳值, 这个最佳值通常都不太高. 它受前腔镜的反射率、光纤长度、光纤掺杂浓度等各种因素的影响. 对于我们的系统, 后腔镜反射率的最佳值在 20% 附近, 因此在写制光栅时应该对写制条件加以控制, 以便得到具有合适反射率的光栅.

根据我们的理论计算, 在抽运光功率为 2.7 W 时, 采用光栅选频输出的激光功率为 720 mW, 明显比我们的试验值偏高. 经分析造成试验值与理论值的差别有以下原因: 一是理论模拟采用的参数很难跟实际情况完全相符, 有一些参数值只能根据文献选取, 影响了模拟的准确度. 二是试验用的 976 nm

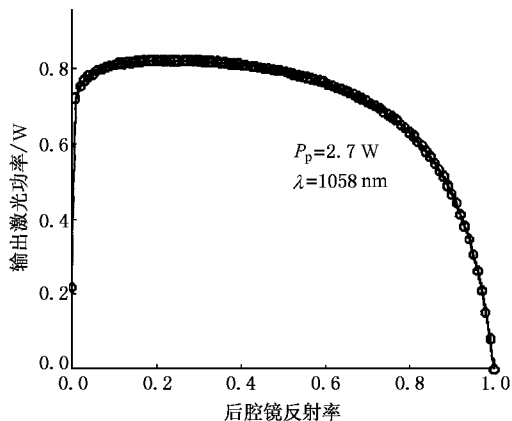


图 7 光纤光栅反射率对激光输出功率的影响

的抽运光的谱宽较宽, 约为 10.2 nm, 而 Yb³⁺ 在 976 nm 处的吸收峰比较尖锐, 其谱宽约为 8 nm, 有一部分抽运能量不能被有效利用, 在计算中忽略了谱宽的影响. 还有一个原因是试验中前腔镜与光纤端面接触不紧密造成输出功率降低, 对光纤端面进行抛磨可以进一步提高输出功率.

由试验可知, 在双包层光纤写制光栅前后的激光输出功率有明显的差别. 在抽运功率为 2.7 W 时, 光栅选频输出功率约为利用光纤端面直接输出激光功率的 80% 左右, 这说明不同的激光波长对输出功率的影响还是非常明显的. 图 8 为 1058 和 1085 nm 两个激光波长的输出功率对比曲线, 由于以上所述原因的影响, 两个波长的输出功率的理论结果都要比实际值偏高, 但能够反映出输出功率上存在明显的差别.

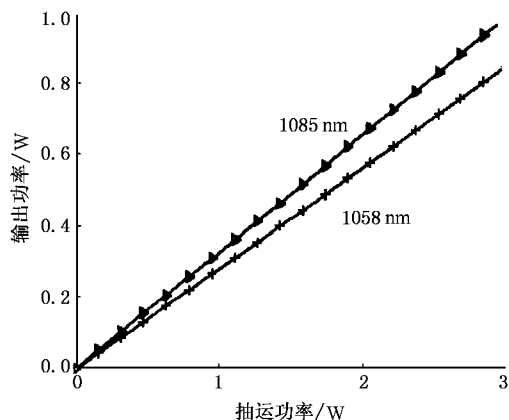


图 8 两种不同波长激光输出功率随抽运功率的变化

对于不同波长的激光, 输出功率随光纤长度的变化也存在着差异. 对于特定的抽运功率, 刚开始随

着光纤长度的增加输出功率也随之增加,直到抽运光被增益介质全部吸收.如果继续增加光纤长度,由于多余的光纤会对激光产生吸收损耗,输出功率将会逐渐下降.即每一套特定的双包层光纤激光器系统,都存在着一个最佳的光纤长度.图9为抽运功率一定时,不同波长激光的输出功率随光纤长度的变化曲线.由于Yb离子在1058 nm处的发射截面较1085 nm处的发射截面要大,在光纤长度较小时,1058 nm激光输出功率比1085 nm激光输出功率要高.

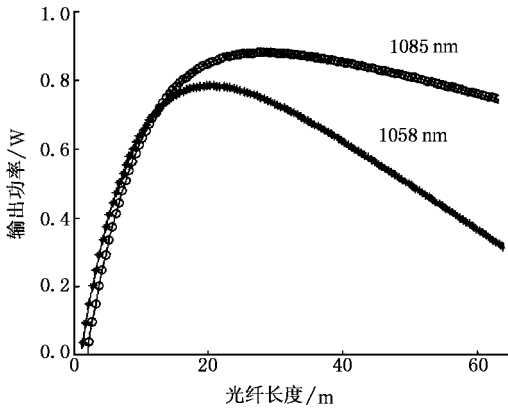


图9 不同波长激光输出功率随光纤长度的变化

同时,在1058 nm处Yb离子的吸收截面也比1085 nm波长处大,光纤对1058 nm激光吸收比较明显,在超过最佳光纤长度后,输出功率随光纤长度增加衰减得更快.这与图9理论模拟的结果完全相符.同时,对于同样的抽运功率,长波长激光对应的最佳光纤长度要比短波长激光对应的最佳光纤长度偏大,从而在实验中选取光纤长度时应加以注意.

5. 结 论

在掺Yb³⁺双包层光纤激光器的输出端光纤上直接写制了低反射率Bragg光栅,作为激光器的选频腔镜,得到了波长为1058.2 nm,线宽为0.196 nm,边瓣抑制比高达40 dB的稳定激光输出,并与直接利用光纤端面输出的双包层光纤激光器的输出特性进行了比较.理论上从速率方程出发,对激光器的一些重要输出特性进行了模拟,与试验结果基本相符.这种光纤光栅选频的掺Yb³⁺双包层光纤激光器使激光器的输出特性得到很大的提高,由于光栅直接写制在增益光纤的一端,不存在耦合对接的问题,从而使激光器的结构变得简单、紧凑,对双包层光纤激光器的全光纤化具有重要的意义.

- [1] Dong X Y, Yuan S Z, Kai G Y *et al* 2001 *Prog. Phys.* **21** 303 [in Chinese] 董孝义、袁树忠、开桂云等 2001 物理学进展 **21** 303
- [2] Alam S U, Turner P W, Grudinin A B 2001 *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit* (Vol. 2) (Anaheim:OSA) TuI4-1
- [3] Normandin X, Leplingard F, Bourova E *et al* 2002 *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit* (Anaheim:OSA) p9
- [4] Fermann M E, Galvanauskas A, Sucha G *et al* 1997 *Appl. Phys. B* **65** 259
- [5] Hardy A, Oron R *et al* 1997 *IEEE J. Quant. Electron.* **33** 307
- [6] Zhang D S, Jiang L, Zhang W G *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3087 [in Chinese] 张东生、姜莉、张伟刚等 2003 物理学报 **52** 3087
- [7] Qiao Q Q, Chen B, Fan W *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1422 [in Chinese] 乔启全、陈柏、范薇等 2003 物理学报 **52** 1422
- [8] Ning D, Huang B C, Xiang Y *et al* 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 313 [in Chinese] 宁鼎、黄榜才、项阳等 2003 光学学报 **23** 313
- [9] Kelson A, Hardy A 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 891

Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser based on fiber Bragg grating^{*}

Fu Sheng-Gui Fan Wan-De Zhang Qiang Wang Zhi Li Li-Jun

Zhang Chun-Shu Yuan Shu-Zhong Dong Xiao-Yi

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

(Received 14 January 2004 ; revised manuscript received 8 June 2004)

Abstract

Fiber Bragg grating (FBG) was successfully fabricated in a Yb^{3+} -doped double-clad fiber with D-shaped inner-cladding by using phase-mask method. Based on the FBG , a stable narrow line-width double-clad fiber laser was successfully demonstrated which resolved the output instability caused by mode-competition in common double-clad fiber lasers. The maximum output power is 570 mW at the wavelength 1058.2 nm with 0.196 nm line-band. Based on rate equations , the relationship between output power and pump power , the reflectivity of the FBG and the optimized length of the fiber were analyzed , which were in good agreement with the experimental results.

Keywords : double-clad fiber grating , Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser , phase-mask method , rate equation

PACC : 4281W , 4280S

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60137010) and the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2003AA312100).