

大模面积掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的实验研究*

谢春霞 吕福云 王 健 胡姝玲 张书敏 董法杰 董孝义

(南开大学物理学院光电信息科学系, 天津 300071)

摘 要 本文研究了在连续泵浦和脉冲泵浦两种情况下, 大模面积(LMA)掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的输出特性. 采用连续泵浦, 在最大泵浦功率为 10.4 W 时, 得到了平均功率 4.6 W、中心波长 1.09 μm 的准连续激光输出. 采用脉冲泵浦, 得到了脉宽小于 50 ns、峰值功率为 5.3 kW、重复频率为 5 kHz、单脉冲能量为 0.26 mJ 的稳定的调 Q 脉冲输出.

关键词 双包层光纤激光器; 大模面积光纤; 二级管泵浦激光器; 脉冲泵浦

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

光纤激光器以其效率高、阈值低、可调谐、紧凑小巧和高性能价格比等优点倍受青睐^[1-3]. 掺 Yb^{3+} 光纤具有宽的吸收光谱(800 ~ 1064 nm)和发射光谱(975 ~ 1200 nm)^[4], 特别是 Yb^{3+} 宽带增益弥补了其它激光光源 1.1 ~ 1.2 μm 处的空白^[5]. 利用包层泵浦技术的掺 Yb^{3+} 光纤激光器的转换效率可达 80%, 输出功率可提高 2 ~ 3 个数量级. 因此, 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器成为近几年人们研究的热点^[6]. 在国内, 武自录等人对掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的输出特性进行了数值分析^[7]; 徐之光等人利用 AOM 和光纤中的受激布里渊散射(SBS), 对掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器进行了混合调 Q 的实验研究, 在国内首次实现了脉宽小于 6 ns 的激光脉冲输出^[8]. LMA 光纤在增加纤芯面积的同时, 通过减小纤芯与包层的相对折射率, 降低数值孔径, 可以维持光纤的单模传输. 对一定的抽运功率, 增加模场面积就可以减小 ASE, 增加光纤中存储的能量, 降低激光功率密度, 因而 LMA 光纤与单模光纤和大芯多模光纤相比, 有利于克服光纤中非线性效应对峰值功率的限制^[9]. 因此本文采用 LMA 掺 Yb^{3+} 双包层光纤作为光纤激光器的增益介质.

本文分别采用了连续泵浦和脉冲泵浦的两种方式, 研究了 LMA 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的输出

特性. 使用多模大功率 LD 连续泵浦, 在泵浦功率为 10.4 W 的情况下, 得到了平均功率 4.6 W、中心波长 1.09 μm 的准连续激光输出. 采用脉冲泵浦(脉宽为 100 μs , 占空比为 1:1), 在 LD 最大注入电流下, 得到了脉宽小于 50 ns、平均功率为 1.32 W、峰值功率为 5.3 kW、单脉冲能量为 0.26 mJ 的稳定的调 Q 脉冲输出, 重复频率为 5 kHz.

1 实验装置

LMA 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的实验装置如图 1. 泵浦源采用中心波长为 976 nm 的多模 LDs, 可以输出脉宽 100 μs ~ 1 ms、重复频率 1 Hz ~ 10 kHz 的脉冲, 并带有直径为 800 μm 的输出尾纤, 数值孔径为 0.22. 耦合器由两只透镜组成, 耦合比为 2:1. 增益介质为美国产 LMA 掺 Yb^{3+} 双包层光纤, 光纤长度为 12 m. 纤芯直径为 20 μm , 数值孔径为 0.06. 内包层为八边形结构, 直径为 400 μm , 数值孔径为 0.46. 八边形结构的内包层不仅将单模的激光限制在纤芯内, 同时还作为泵浦光的通道. 包层对 975 nm 泵光的吸收系数为 2 dB/m. 激光器的谐振腔由二相色镜(对 976 nm 透射率为 90%、对 1064 nm 反射率为 99.5%)和光纤端面 4% 的非涅尔反馈构成, 光纤端面紧贴二相色镜放置. 光纤后端面输出的信号光通过半球透镜准直.

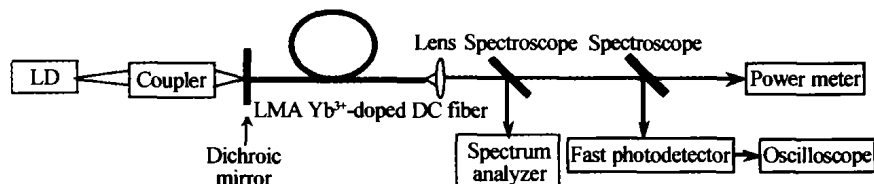


图 1 大模面积掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器实验装置

Fig. 1 The set-up of the large-mode-area Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser

*国家重点基金资助项目(No. 60137010)、国家自然科学基金(No. 69977012)、天津市自然科学基金项目资助课题(No. 99380101)

Tel: 022-23509856 Email: xiechunxia@eyou.com

收稿日期: 2004-03-15

在实验中, 使用带宽 20 GHz 的 PIN 硅快速光电探测器(HTP75 InGaAs)和带宽 500 MHz 的示波器(HP54616B)观测激光器的时域特性, 并通过激光打印机打印输出; 同时使用 LP-3C 型功率计监测其

功率,用 MS9001B1 型光谱分析仪观测输出激光的光谱特性.

2 实验结果及分析

2.1 连续泵浦

采用图 1 所示的实验装置,使用连续泵浦的方式. 实验测得的 LMA 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的输出功率随泵浦功率变化的关系曲线如图 2. 当泵浦功率为 1.52 W 时,达到了激光器的阈值,开始有激光输出. 在最大泵浦功率 10.4 W 的情况下,得到了 4.6 W 的激光输出,斜率效率为 51.8%. 激光器的中心波长在 1.09 μm 左右,图 3 是在泵浦功率为 6.6 W 时激光器的输出光谱图. 从光谱图中可以看出,除了 1.09 μm 的信号光之外,还有少量剩余泵光存在,这是由于随着 LD 的注入电流逐渐加大,泵浦光的中心波长向长波方向漂移,更加远离 Yb³⁺ 的吸收峰 975 nm,因而泵浦光不能被完全吸收.

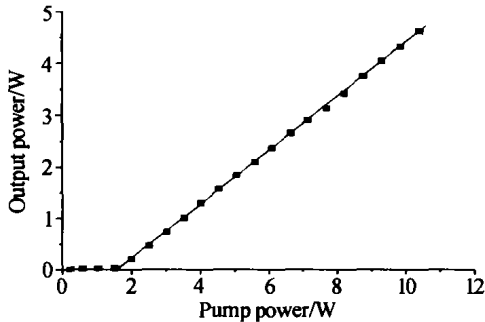


图 2 激光器的输出功率特性曲线
Fig. 2 Output power vs pump power

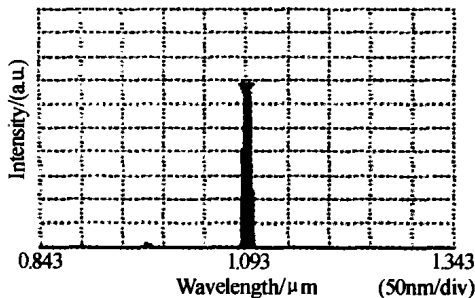


图 3 掺 Yb³⁺ 光纤激光器输出光谱图 ($P_p = 6.6 \text{ W}$)
Fig. 3 Spectrum of the laser output ($P_p = 6.6 \text{ W}$)

图 4 是在泵浦功率分别 2 W 和 5 W 时从示波器上观测到的激光器的时域特性图. 当泵浦功率刚过阈值时,激光输出表现为一些无规律的脉动,如图 4 (a). 随着泵浦功率逐渐增加,激光输出表现为准连续光,如图 4 (b). 由于我们使用的是 LMA 掺 Yb³⁺ 双包层光纤,其中的非线性效应比普通掺 Yb³⁺ 双包层光纤小,因此在连续泵浦的实验中,并没有观察到 SBS 等非线性效应,得到的是准连续激光输出.

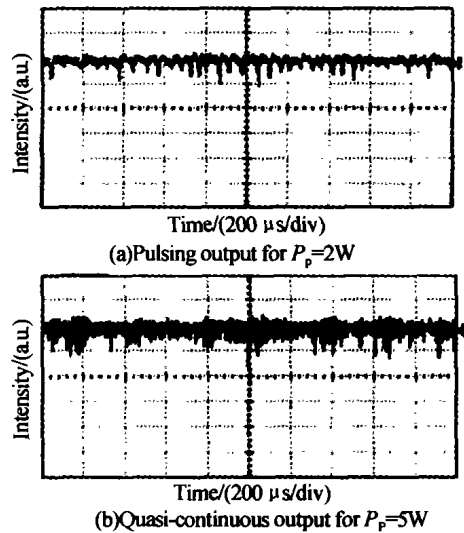


图 4 连续泵浦时激光器的时域特性
Fig. 4 Output characters with CW pump light

2.2 脉冲泵浦

实验装置仍如图 1,改为方波脉冲泵浦的方式. 实验中所采用的泵浦脉冲的宽度为 100 μs,周期为 200 μs,占空比为 1:1. 由于采用了脉冲泵浦的方式,泵浦光的平均功率降低为采用连续泵浦时功率的 1/2.

当泵浦光的平均功率为 1.58 W 时,达到了 LMA 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的阈值,开始有激光脉冲序列输出,脉冲周期为 400 μs. 脉冲的出现是由于采用脉冲泵浦的原因,采用脉冲泵浦相当于在激光谐振腔内引入了增益调制开关,主动调节谐振腔内的 Q 值. 但由于此时泵浦功率很小,一个泵浦脉冲造成的增益介质上能级的反转粒子数密度不足以形成激光输出,因而两个泵浦脉冲才对应着一个信号光脉冲输出.

随着泵浦功率的逐渐加强,输出信号光的峰值功率逐渐增加. 当泵浦光的平均功率达到 1.77 W 时,输出信号光的脉冲周期变为 200 μs,与泵浦光脉冲周期相同. 图 5 (a) 为泵浦光平均功率为 1.9 W 时激光器典型的脉冲输出,重复频率为 5 kHz,图 5 (b) 为图 5 (a) 中单脉冲的展开图,脉冲宽度为 3 μs. 可以看出,由于采用了脉冲泵浦主动调 Q 的方式,脉冲宽度被压窄了 2 个数量级.

当泵浦功率增加到 2.1 W 时,每一个主脉冲后面又出现了一个 μs 量级的次脉冲,如图 6. 这是由于泵浦脉冲很宽同时泵浦功率又很高的情况下,泵浦光脉冲抽运的反转粒子数不能够在一个激光脉冲中完全被消耗,导致了反转粒子数的剩余,从而产生了次脉冲. 随着泵浦功率的逐渐提高,次脉冲的个

数逐渐增多,主脉冲宽度逐渐减小、强度逐渐增加.

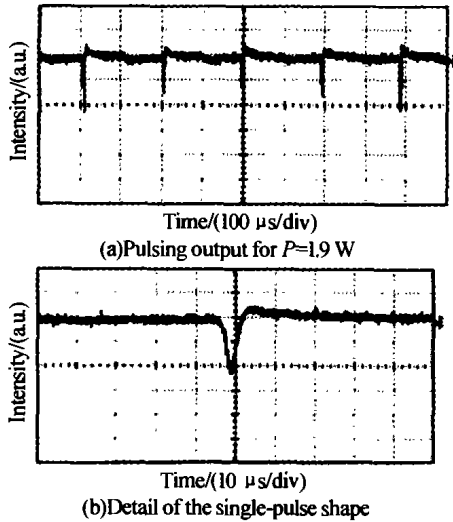


图5 脉冲泵浦时激光器的时域特性
Fig. 5 Output pulses with pulsed pump light

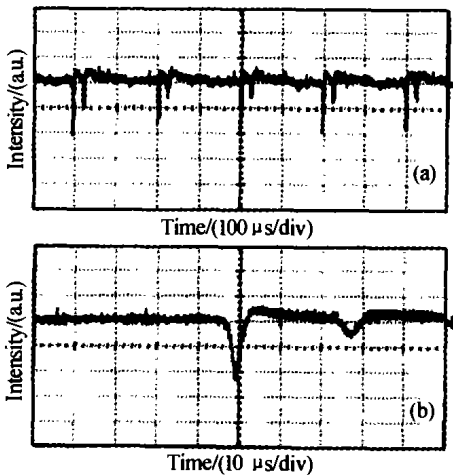


图6 (a) $P=2.1\text{ W}$ 时带有次脉冲的输出; (b) 单脉冲的展开图
Fig. 6 (a) The output with sub-pulses for $P=2.1\text{ W}$;
(b) Detail of the single-pulse shape

当泵浦功率增加到 3.9 W 时,观测到了 ns 量级的激光巨脉冲序列. 这是由于光纤中出现了 SBS 效应. 由于 Yb^{3+} 光纤的掺杂浓度较高,光纤的增益较大,光纤中极易形成后向的瑞利散射效应 (RS),为谐振腔提供了附加的反馈. 后向的 RS 再被二色镜反射回 Yb^{3+} 光纤,形成双 RS 的分布式干涉仪,使激光器的线宽有效地被压窄,适于泵浦 SBS,增加了光纤中产生 SBS 的可能性,瑞利反馈及腔自身提供的弱反馈均可使 SBS 阈值降低. 另一方面,由于采用脉冲泵浦,虽然激光器谐振腔内的平均功率不高,但峰值功率很高,达到所降低的 SBS 阈值时即可产生 SBS 效应, SBS 将绝大部分输入功率转移到后向斯托克斯波. 也就是说脉冲泵浦和 SBS 效应进行了主被动混合调 Q,从而产生了重复频率稳定的 ns 量级的脉冲输出. 图 7(a) 是泵浦光的平均功率为 5 W 时的混合调 Q 脉冲输出图,脉冲周期为 $200\ \mu\text{s}$,图 7(b) 是主脉冲的展开图,脉冲宽度约为 50 ns . 在 LD

最大注入电流下,可以得到脉宽小于 50 ns 、平均功率为 1.32 W 稳定的调 Q 脉冲输出,其峰值功率为 5.3 kW ,单脉冲能量为 0.26 mJ ,重复频率为 5 kHz .

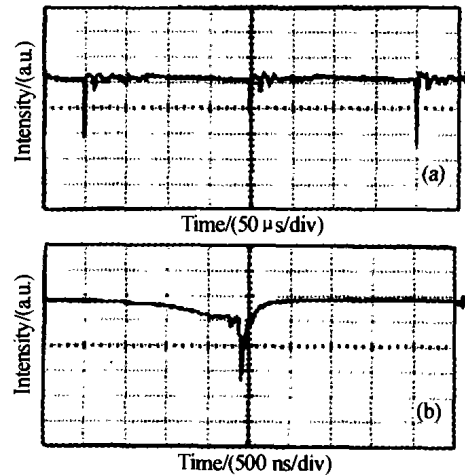


图7 (a) $P=5\text{ W}$ 时的脉冲输出; (b) 单脉冲的展开图
Fig. 7 (a) Output pulse train for $P=5\text{ W}$; (b) Detail of the single-pulse shape

3 结论

本文使用 12 m 长的 LMA 掺 Yb^{3+} 双包层光纤作为激光器的增益介质,分别研究了在连续泵浦和脉冲泵浦的条件下激光器的输出特性. 在连续泵浦的情况下,当泵浦功率为 10.4 W 时,得到了 4.6 W 的、中心波长为 $1.09\ \mu\text{m}$ 的准连续激光输出,斜率效率为 51.8% . 采用脉冲泵浦(脉宽为 $100\ \mu\text{s}$,占空比为 $1:1$),在 LD 最大注入电流下,得到了脉宽小于 50 ns 、峰值功率为 5.3 kW 、单脉冲能量为 0.26 mJ 的稳定的调 Q 脉冲输出,平均功率为 1.32 W ,重复频率为 5 kHz .

参考文献

- 1 Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 110 W fiber laser. *Electron Lett*, 1999, **35**(14): 1158 ~ 1160
- 2 DiGiovanni D J, Muendel M H. High-power fiber laser. *Opt Photon News*, 1999, **10**(1): 26 ~ 30
- 3 Muendel M H. High-power fiber laser studies at the Polaroid Corporation. *Proc SPIE*, 1998, **3264**: 21 ~ 29
- 4 Hanna D C, Percival R M, Perry I R, et al. An Ytterbium-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from $1.01\ \mu\text{m}$ to $1.162\ \mu\text{m}$ and three level operation at 974 nm . *J Mod Opt*, 1990, **37**(2): 329 ~ 331
- 5 晓晨. 2002 年光纤激光器研究与应用最新进展研讨会. 激光与光电子学进展, 2002, **19**(8): 55 ~ 56
Xiao C. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, **19**(8): 55 ~ 56
- 6 阮双琛, 苏红新, 冯鸣, 等. 8.6 W 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的研究. 光子学报, 2003, **32**(5): 523 ~ 524
Ruan S C, Su H X, Feng M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 523 ~ 524

- 7 武自录,陈国夫,王贤华,等. 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的数值分析. 光子学报,2002,31(3):332~336
Wu Z L, Chen G F, Wang X H, et al. *Acta Photonica Sinica*,2002,31(3): 332~336
- 8 徐之光,戴武涛,樊亚仙,等. 可调谐的调 Q 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器. 光子学报,2003,32(5):520~522
Xu Z G, Dai W T, Fan Y X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 520~522
- 9 Broderick N G R, Offerhaus H L, Richardson D J, et al. *Large mode area fibers for high power applications. Optical Fiber Technology*, 1999,5(2): 185~196

Experimental Study on Large-mode-area Yb^{3+} -doped Double-clad Fiber Laser

Xie Chunxia, Lu Fuyun, Wang Jian, Hu Shuling, Zhang Shumin, Dong Fajie, Dong Xiaoyi

Department of Optical-Electronic Information Science, Institute of Physics, Nankai University, Tianjin, 300071

Received date:2004-03-15

Abstract A large-mode-area Yb^{3+} -doped double clad fiber laser operating in CW pump and pulsed pump regime, respectively, is described. With CW pump, a 4.6 W quasi-continuous output operating in the 1.09 μm is obtained, when the pump power is 10.4 W. With pulsed pump, the laser generates nanosecond pulses with a stable repetition rate of 5 kHz. A single-pulse energy of as much as 0.26 mJ with a peak power of 5.3 kW is obtained.

Keywords Double clad fiber laser; Large-mode-area fiber; Diode-pumped laser; Pulsed pump



Xie Chunxia was born in 1980. She is a graduate student of the Department of Optical-Electronic Information Science, Institute of Physics, Nankai University and engaged in fiber laser technology, ultrashort optical pulses and optical communications.