

文章编号:1004-4213(2010)02-0197-5

主振荡功率放大短脉冲光纤激光系统的 偏振特性研究*

付圣贵¹, 刘晓娟¹, 刘艳格²

(1 山东理工大学 理学院, 山东 淄博 255049)

(2 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要:对自行研制的主振荡功率放大结构短脉冲双包层光纤激光系统(2 W, 30 ps)的偏振特性进行了研究. 分别研究了种子源激光和经过包层泵浦放大后输出激光在连续工作和脉冲输出情况下的偏振特性, 结果表明在不加偏振控制措施情况下, 系统输出为椭圆偏振光, 偏振度和偏振角都容易受到光纤扰动的影响; 在激光腔内加入起偏器后, 输出线偏振光, 偏振态相对比较稳定, 但是偏振角度仍然容易受到光纤扰动的影响. 实验证明: 经过高功率放大后, 输出激光的偏振态稳定性有一定程度的下降, 在进行激光相干合成前需进一步加以控制.

关键词:主振荡功率放大; 偏振特性; 光纤激光器; 脉冲

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103902. 0197

0 引言

高功率光纤激光系统由于谐振腔结构灵活紧凑、优异的散热性能以及高光束质量等特点, 在工业加工、军事、医疗等方面具有非常大的发展潜力^[1-2].

某些固体激光器由于晶体结构原因可以直接输出偏振激光, 而光纤激光器本身输出激光的偏振性能很差, 并且很容易受到外界环境的影响^[3-4]. 在一些应用场合, 特别是最近兴起的光纤激光相干合成领域, 对输出激光的偏振性有极高的要求, 往往还需要对激光的偏振态进行有效地控制, 以方便将多路激光有效合成^[5-6]. 对于光纤激光系统, 在享有其诸多光纤化优点的同时, 由于光纤对温度、应力等物理量的敏感度较高, 因此容易受到外界环境的干扰^[3]. 为了获得偏振激光输出, 最为常用的手段是采用在光路中加入偏振控制器件, 或者采用保偏掺杂光纤作为增益介质, 通常可获得较好的偏振激光输出^[7-8]. 采用主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构光纤激光系统是进行相干合成研究的一个重要途径, 一般低功率种子源部分可以较为方便地获得偏振激光输出, 然后对种子光进行放大获得高功率激光^[9-11]. 高功率 MOPA 激光系统放大部分采用包层泵浦方式, 与种子源的结构存在较大差异, 引入较多的干扰因素, 其

相关环节给激光偏振特性带来的影响需要深入的研究.

本文对课题组自行研制的 MOPA 结构的短脉冲、包层泵浦光纤激光系统的偏振特性进行了系统的研究. 为了便于比较, 对种子源激光和经过包层泵浦放大后输出激光在连续工作和脉冲输出情况下的偏振特性分别进行了研究. 结果表明: 在不加偏振控制措施情况下, 系统输出为椭圆偏振光, 偏振度和偏振角都容易受到光纤扰动的影响; 在激光腔内加入起偏器后, 输出线偏振光, 偏振态相对比较稳定, 但是偏振角度仍然容易受到光纤扰动的影响, 可以加偏振控制器加以改善. 实验结果对于下一步进行的光纤激光相干合成系统的研制具有重要的参考价值.

1 实验装置

MOPA 结构的包层泵浦激光系统装置如图 1^[12]. 实验装置包括由环形腔掺 Er 光纤激光器构成的种子源部分和由 Er/Yb 共掺双包层全光纤构成的放大器部分. 图 1(a)虚线框内为种子源部分, 利用 1 480 nm 半导体激光器进行泵浦, 调制器可以选择插入或短路状态, 从而可以实现连续输出或者锁模输出. 图 1(b)虚线框内部分为放大光路. 种子源与放大光路通过光纤跳线连接, 测量种子源部分输出特性时直接将放大光路断开即可. 其中, ISO(Isolator); PC(Polarization controller); EDF(Er-doped fiber); EYDF(Er/Yb co-doped fiber); LD:

* 山东省高等学校科技计划项目(J09LG11)资助

Tel: 0531-2286289

Email: fushenggui@gmail.com

收稿日期: 2009-07-06

修回日期: 2009-10-21

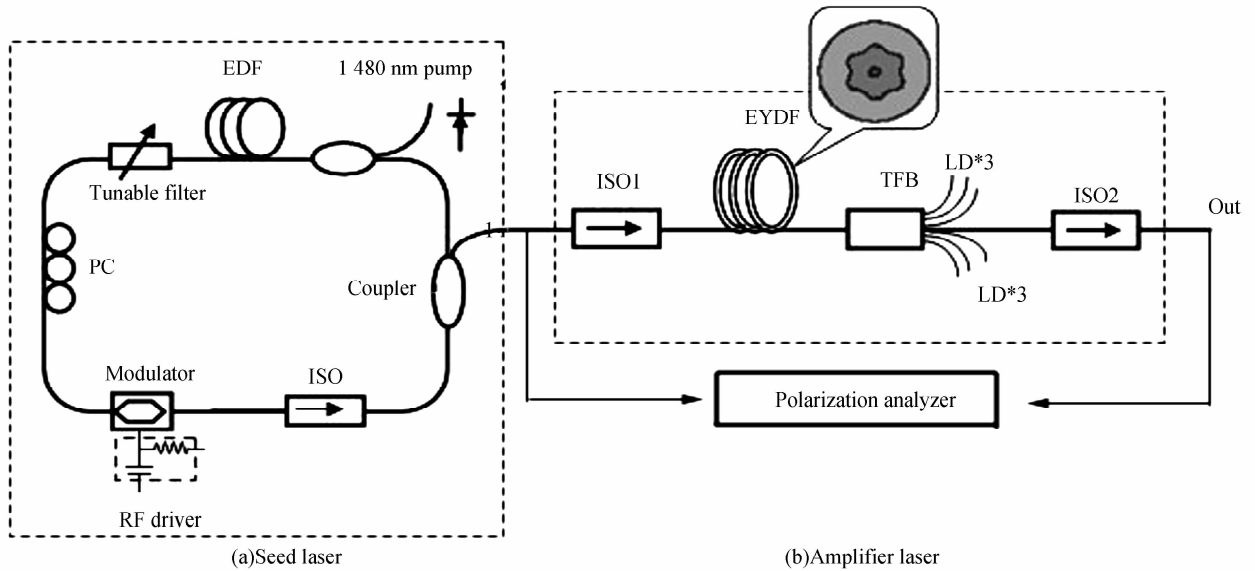


图 1 MOPA 结构短脉冲 Er/Yb 共掺光纤激光系统
Fig. 1 MOPA structure short-pulse Er/Yb fiber laser system

(Laser diode); TFB(Taperd fiber bundle). 信号光经过隔离器后耦合进入 Er/Yb 共掺双包层光纤, 增益光纤长度为 10 m, 双包层光纤的内包层形状为梅花形, 数值孔径为 0.45, 外径 125 μm , 放大部分采用 6 个 LD 进行泵浦, 每个 LD 输出功率为 1 W. 泵浦源通过一个 6 \times 1 锥形光纤束耦合器将能量耦合到双包层光纤中. 种子光功率为几个毫瓦, 经过双包层光纤放大后最高功率可达 2 W 以上. 本文使用偏振分析仪分别从信号源输出端和放大器输出端来分别测试信号光和放大后信号光的偏振态特性, 所用偏振分析设备为 Thorlabs 公司生产 PAT9000B 偏振分析仪. 图 2 为激光系统在锁模状态下输出的放大后的激光脉冲序列, 脉宽为 35 ps, 重复频率 10 GHz, 最大输出功率为 2 W.

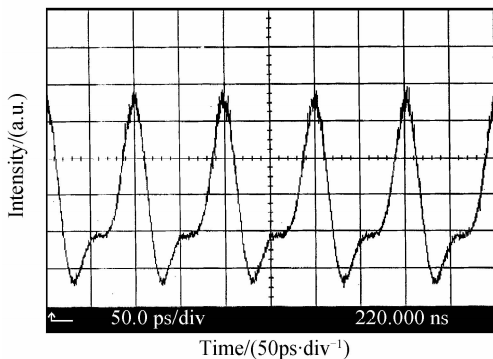


图 2 MOPA 系统锁模状态下输出短脉冲序列
Fig. 2 Mode-locking pulse train of MOPA system

2 实验结果及分析

2.1 连续输出时输出激光的偏振特性

首先对系统连续输出时偏振态进行研究. 调节可调谐滤波器, 将系统的输出波长设定在

1 550 nm. 种子源部分的输出功率为 3 mW, 放大后的最高输出功率为 2 W.

在光路中没有加任何偏振控制措施时, 对种子激光的偏振特性进行了测试, 实验结果如图 3(a). 图 3 中曲线的横坐标为时间, 上、中、下三条曲线分别描述的是激光偏振的方位角、椭圆率和偏振度. 从偏振态参量随时间变化的曲线可以看出在测试时间

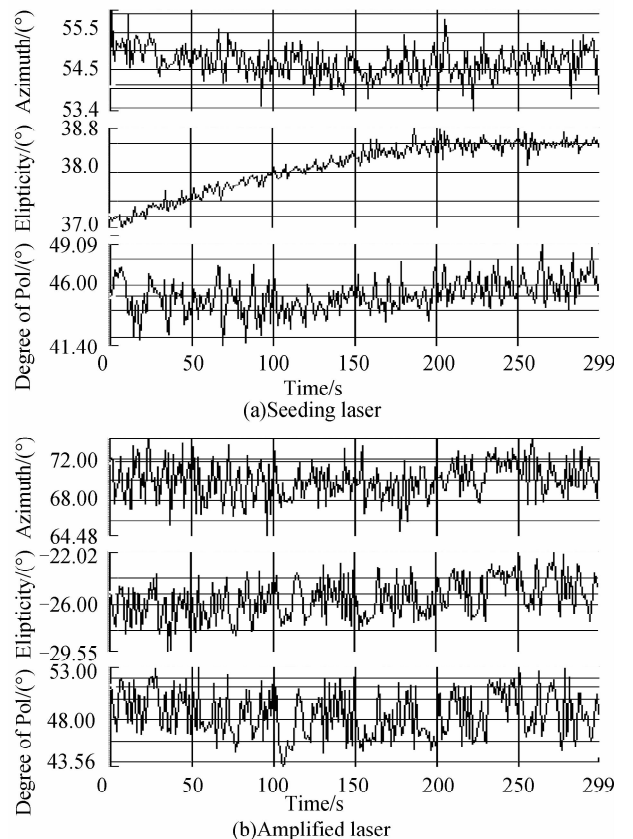


图 3 未加偏振器时连续输出种子光的偏振特性
Fig. 3 Polarization character of the seeding laser without polarizer

内,信号光的偏振度变化在 $41.40^{\circ}\sim 49.09^{\circ}$,平均值为 45.22° ,放大后激光的偏振度变化在 $43.56^{\circ}\sim 53.00^{\circ}$,平均值为 48.51° ;种子光的偏振方位角在 53.4° 和 56.1° 之间振荡,放大光偏振方位角在 $64.5^{\circ}\sim 74.8^{\circ}$ 波动,放大前后偏振方向都存在较大的波动;放大后激光的偏振长短轴的椭圆率波动也比种子光明显。

从前文结果得知,在未加偏振措施情况下,光纤激光器输出激光为椭圆偏振光,并且偏振方位角和偏振度、椭圆率均有一定程度波动,说明光纤激光器输出特性对外界扰动非常敏感.特别是在加放大端后,因为对光路的进行了调整,偏振方向具有很大的跳变,测量时间内激光偏振方向变化都在 10° 以上。

图 4 为在种子源光路中加入偏振器后输出激光的偏振态测试结果.同样,三条曲线从上到下分别对应输出激光偏振方位角、椭圆率和偏振度随时间变化的测量结果.从图中可以看出,加入起偏器后,种子源输出激光的偏振度在测量时间内的变化为 $99.53^{\circ}\sim 99.59^{\circ}$,平均值为 99.56° ,具有较高的偏振度,并且稳定性也比较好.经过包层泵浦放大后,输出激光的偏振度变化在 $93.29^{\circ}\sim 100.0^{\circ}$,平均值为 98.84° ,放大后激光的偏振度略有降低,并且稳定性也比原来要差.可以看出在光路中加入偏振片后,激

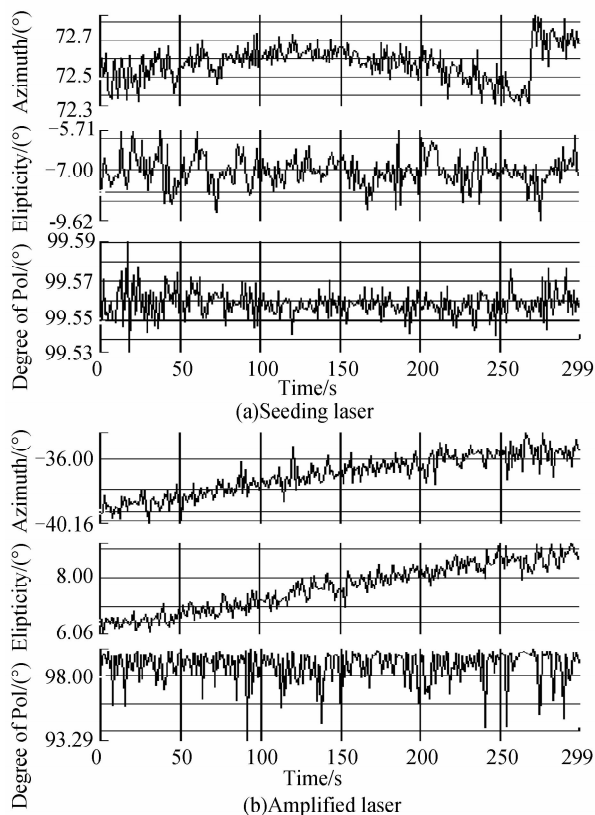


图 4 加偏振器后连续输出种子光的偏振特性
Fig. 4 Polarization character of the seeding laser with polarizer

光偏振度明显提高,接近线偏振输出,并且偏振稳定性也得到明显改善.同样,经过放大后激光的偏振态稳定性有一定程度下降,这是由于光路中光纤总体长度增加,器件也增多,引入了附加的干扰因素.从图中也可以发现,放大前后输出激光偏振方向同样存在较大跳变,多路激光如果保持偏振方向一致的话,必须加偏振控制器调整。

图 5 描述了起偏器件对输出激光偏振特性的影响,图中横坐标为偏振方位角,纵坐标为偏振度,每一个点代表一个不同的偏振状态,图 5(a)是没加起偏器时,输出种子激光与放大激光的偏振状态,图 5(b)为光路中插入起偏器后的输出种子激光和放大后输出激光的偏振状态.可以发现,加入起偏器后,种子激光的偏振度和稳定性均得到大幅提高,经过放大后,激光仍具有较高的偏振度,偏振方位比较稳定,但是偏振度稳定度差一些。

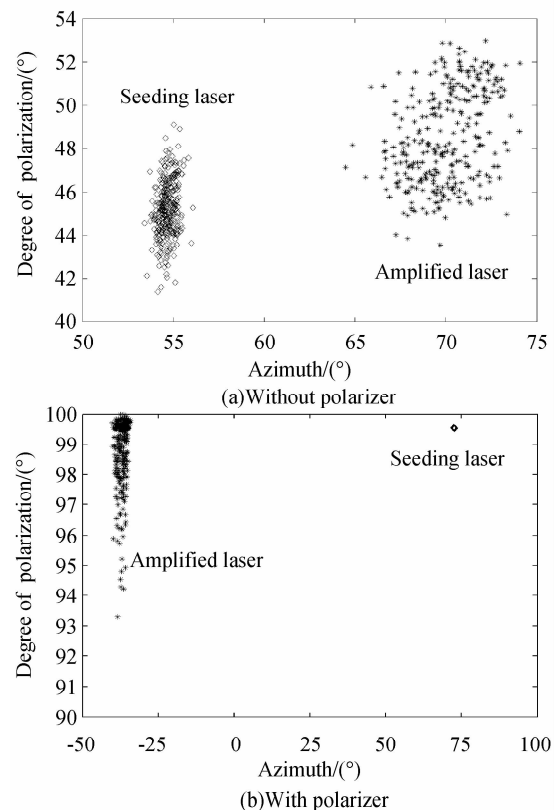


图 5 脉冲种子源光路中加入起偏器前后偏振态对比
Fig. 5 Polarization characteristic of the master oscillator with polarizer and without polarizer in system

2.2 脉冲输出时输出激光的偏振特性

在种子源光路中接入光调制器,构成主动锁模输出,经过合理设计,系统输出脉冲宽度可达 30 ps ,重复频率最高 10 GHz ,放大输出功率最高可达 2 W 。

图 6 为系统输出激光的偏振态参量随时间变化的曲线.可以看出,偏振方位角由于很容易受到光纤的影响,在加入放大级后,有较大变化.信号光的偏

振度变化在 $97.91^\circ \sim 99.73^\circ$, 平均值为 99.30° , 放大后信号光的偏振度变化在 $94.29^\circ \sim 97.60^\circ$, 平均值为 96.40° , 放大后信号光的偏振度略有降低, 偏振态稳定性略有下降。

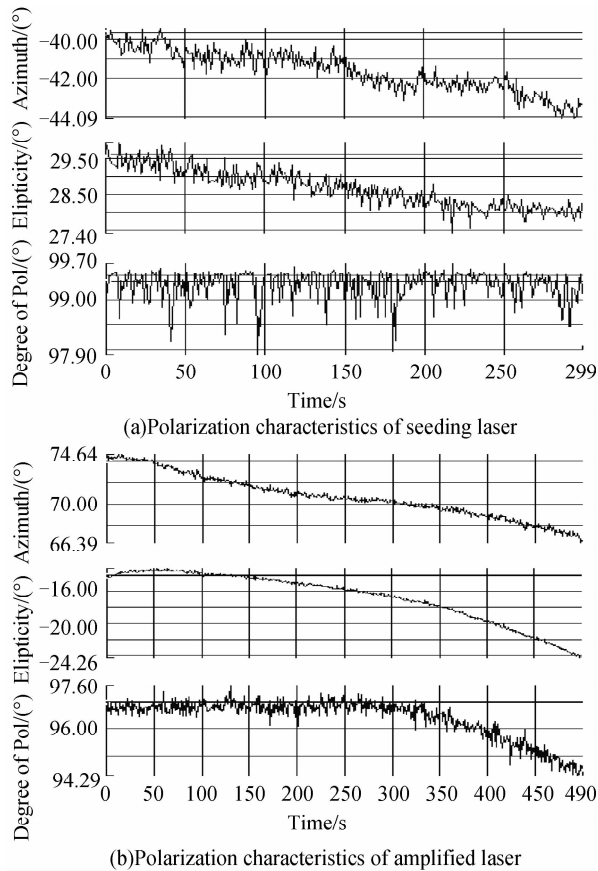


图6 MOPA系统输出脉冲激光的偏振特性
Fig. 6 Polarization characteristic of the pulsed MOPA source

图7为锁模脉冲输出时,种子光和放大输出激光的偏振态变化轨迹图。可以看出种子光经放大后,激光的偏振度有所下降,偏振方位角跳变后波动大小与种子光偏振方位角波动大小基本相似,但是偏振度下降的同时,不稳定性也有所增加。

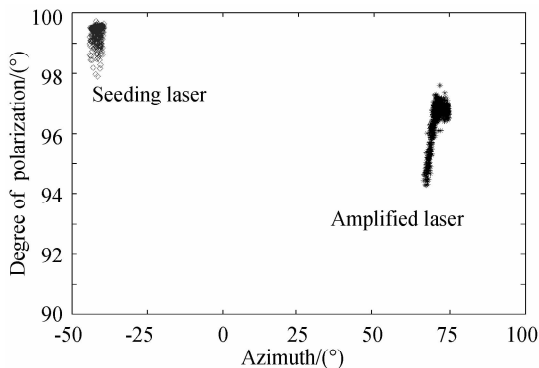


图7 种子光偏振态和放大后激光偏振态对比
Fig. 7 Polarization state of the master source and the fiber amplifier

3 结论

经过本课题组对自行研制的MOPA结构脉冲

输出光纤激光系统的偏振特性的详细研究,实验证明:在未加起偏器件的情况下,光纤激光器输出为椭圆偏振光,偏振度一般不到50%,方位角很容易受到光纤的震动、应力等扰动的影响,特别是方位角的变化非常明显;腔内加入起偏器后,输出为线偏振光,稳定性得到一定改善,但偏振状态特别是方位角仍然容易受到光纤扰动的影响;种子光经包层泵浦放大后,偏振态发生一定程度改变,特别是稳定性下降,这是因为附加的高功率泵浦放大光路增加了系统的复杂度,更容易受到外界环境的影响。在光路中增加偏振元件后,系统输出激光具有较高偏振度,偏振方向相对较稳定,但是偏振度大小波动较大。实验结果表明,MOPA光纤激光系统输出激光的偏振特性很容易受到外界环境的影响。对于光束的相干合成,机理上主要有两种,一是主动控制相干合成,二是自组织相干合成。主动控制相干方式,需要对每个支路的偏振态进行严格的控制,由于光纤容易受到外界因素的影响,技术手段相当复杂。而利用系统的自组织功能,能够从各种复杂的情况中调整自身状态,达到相干合成,在目前主动控制技术不够完善的情况下,自组织相干合成不失为一种简单可行的相干合成方式。

参考文献

- [1] JEONG Y, SAHU J, PAYNE D, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt Express*, 2004, **12**(25): 6088-6092.
- [2] ZHU Hong-tao, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.*, Theoretical study on the heat dissipation ability of double-cladding photonic crystal Fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 60-63.
朱洪涛, 楼祺洪, 周军, 等. 双包层光子晶体光纤激光器散热能力的理论研究 [J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 60-63.
- [3] LIAO Yan-biao. Fiber optics [M]. Beijing: Tisinghua University Press, 2000: 67.
廖延彪. 光纤光学 (M), 北京: 清华大学出版社, 2000: 67.
- [4] NING Ti-gang, PEI Li, HU Xu-dong, *et al.* Dual-wavelength of single polarized fiber laser based on common active fiber [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, **35**(12): 1868-1871.
宁提纲, 裴丽, 胡旭东, 等. 单偏振双波长非保偏有源掺杂光纤激光器 [J]. 中国激光 2008, **35**(12): 1868-1871.
- [5] ZHU Song-jun, ZHANG Bin, YIN Su-qin, *et al.* Analysis of combining efficiency of spectral combining technique for fiber lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 11-15.
祝颂军, 张彬, 阴素芹, 等. 光纤激光器谱合成系统合成效率的计算分析 [J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 11-15.
- [6] PHUA P, LIM Y. Coherent polarization locking with near-perfect combining efficiency [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(14): 2148-2150.
- [7] REN Guang-jun, YAO Jian-quan, WANG Peng, *et al.* Experimental study on polarization-maintaining fiber laser [J].

- Chinese J Lasers*, 2007, **34**(9):1208-1211.
- 任广军 姚建铨 王鹏等,保偏光纤激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(9):1208-1211.
- [8] SHI Chao-xiang. A novel twisted Er-doped fiber ring laser: proposal, theory, and experiment [J]. *Opt Commun*, 1996, **125**: 349-358.
- [9] HOU J, XIAO R, JIANG Z F, *et al.* Coherent beam combination of two polarization maintaining ytterbium fibre amplifiers [J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22**(9): 2273-2275.
- [10] AUGST S, FAN T, SANCHEZ A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(5):474-476.
- [11] WANG Yuan-xiang, JIANG Pei-pei, YANG Ding-zhong, *et al.* MOPA structured pulsed Yb fiber laser with high average power [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3):456-459.
- 汪园香,姜培培,杨丁中,等. 基于 MOPA 结构的高功率线偏振脉冲 Yb 光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(3): 456-459.
- [12] LIU Yan-ge, ZHANG Chun-shu, SUN Ting-ting, *et al.* Clad-pumped Er/Yb-codoped short pulse fiber laser with high average power output exceeding 2W [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9):4679-4685.
- 刘艳格,张春书,孙婷婷,等. 输出平均功率大于 2W 的高功率、包层泵浦、超短脉冲铒镱共掺光纤激光器. 物理学报[J]. 2006, **55**(9):4679-4685.

Polarization Characteristics of the Master Oscillator Power Amplified Short-pulse Fiber Laser System

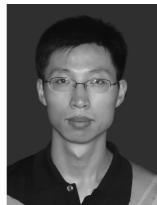
FU Sheng-gui¹, LIU Xiao-juan¹, LIU Yan-ge²

(1 School of Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049 China)

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

Abstract: Based on the master oscillator power amplifier (MOPA) system including a single mode erbium-doped fiber laser used as the master oscillator, and a large-mode-area Erbium/Ytterbium double-clad fiber used as the amplifier gain medium, the polarization states of the seeding laser and the amplified laser are experimentally investigated. The results show that the polarization degree of the output laser of the amplifier is very low without any polarization control device; after inserting a polarizer in the loop of the signal source, the degree of polarization is improved evidently and the stability of the polarization state becomes better, both for continuous wave operation and for mode-locked operations. The mode-locked operation has a little lower polarization degree and a better stability than the continuous wave operation of the amplifier. When a polarizer introduced in the loop of the signal, the instability of the polarization state of the output of amplifier is mainly caused by the polarization parameter azimuth. As a result, the combination use of a polarizer and a polarization controller is supposed to improve the polarization degree and the stability of the output of the amplifier, furthermore, polarization-maintaining gain fiber is recommended to be used to avoid the random perturbation of the environment. The work offers an important experimental basis for the control of the polarization state in the laser beam coherent combination.

Key words: Master oscillator power amplifier; Polarization; Fiber laser system; Pulse



Fu Sheng-gui was born in 1977. He received the Ph. D. degree in optics engineering from Nankai University in 2005. Now he is an associate professor at Shandong University of Technology, and his current research interests focus on fiber lasers, fiber gratings and fiber sensors.