

文章编号: 1001-3806(2009)04-0400-03

高功率掺 Yb³⁺ 大模场光纤放大器实验研究

黄小东^{1,2}, 张小民^{2*}, 李明中², 王建军², 张锐², 赵圣之¹, 车雅良², 许党朋²

(1. 山东大学 光学工程系, 济南 251000 ; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究高功率光纤放大器的工作特性, 采用两级光纤放大器对整形脉冲进行放大, 得到放大后的脉冲能量为 10 μJ、峰值功率为 2.4 kW。发现当抽运功率高于 1.4 W 时, 输出功率变得很不稳定, 甚至出现了能量很高的巨脉冲。模拟了掺 Yb³⁺ 大模场光纤放大器, 模拟结果与实验结果吻合较好。结果表明, 信号光峰值功率放大到几千瓦时尚未饱和, 光纤内仍有很多剩余储能, 重新对放大器的设计进行优化, 可以获得更高的能量。

关键词: 光纤光学; 掺 Yb³⁺ 光纤; 大模场光纤放大器; 数值模拟; 巨脉冲

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.019

Experiment study of the high power Yb-doped large-mode-area fiber amplifier

HUANG Xiao-dong^{1,2}, ZHANG Xiao-min¹, LI Ming-zhong², WANG Jian-jun²,
ZHANG Rui², ZHAO Sheng-zhi¹, CHE Ya-liang², XU Dang-peng²

(1. Department of Engineering Optics, Shandong University, Ji'nan 251000, China; 2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to study the property of high power fiber amplifiers, the output energy of 10 μJ and the peak power of 2.4 kW were obtained respectively after the shaped signal pulse is amplified by a two-stage fiber amplifier. However, the pump power was larger than 1.4 W, the output energy became unstable and giant pulse was detected. It was found that the output signal was not saturated and there was lots of residual energy in the fiber even the output signal was large up to a few kW. Higher power can be obtained if the design of the fiber amplifier was optimized. The Yb-doped large-mode-area fiber amplifier was simulated, and the result was identical with the experiment result.

Key words: fiber optics; Yb-doped fiber; large-mode-fiber amplifier; simulation; giant pulse

引言

近几年, 掺 Yb³⁺ 光纤放大器和掺 Yb³⁺ 光纤激光器朝着大功率方向发展, 尤其掺 Yb³⁺ 光纤放大器受到了人们极大的关注。与其它掺杂光纤相比, 掺 Yb³⁺ 光纤有几个比较重要的特点: 能级结构简单、不存在对抽运光或者信号光的激发态吸收、不存在浓度淬灭效应(可以有很高的掺杂浓度)、转化效率高。另外, Yb³⁺ 较宽的激光发射谱, 尤其对某些特殊波长(1053 nm)的功率放大, 对现在大功率激光装置尤为重要; 另一方面, 掺 Yb³⁺ 光纤还具有较宽的吸收谱(860 nm ~ 1064 nm), 允许多种抽运源, 可使用技术成熟的 980 nm 半导体激光器作为抽运源。而随着双包层光纤以及包层抽运技术的发

展, 双包层光纤具有了抽运效率高、稳定等优点。

对掺镱光纤放大器的理论研究^[1]和数值模拟^[2-6]已经很多, 但实验研究相对较少^[7-8], 尤其像本文中采用两级放大, 得到能量为几微焦耳、输出功率高达几千瓦的脉冲国内尚未见报道。另外, 实验中还发现, 随着 2 级放大器抽运功率的增加, 输出功率变得十分的不稳定, 甚至出现了远远高于信号脉冲能量的“巨脉冲”。

1 实验及结果

实验采用 2 级光纤放大器对信号光进行放大, 具体结构如图 1 所示, 实验中采用 980 nm LD 作为抽运光源, 大模场光纤长度为 10 m, 芯径为 15 μm, 包层直径为 130 μm, 其中包层对 975 nm 的吸收损耗为 6 dB/m, 包层的数值孔径为 0.08 ± 0.01, 光纤隔离器的消光比

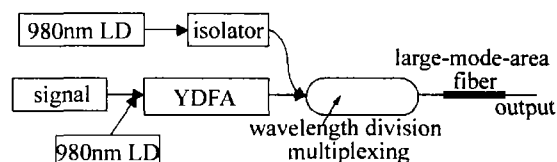


Fig. 1 Experimental setup of the Yb-doped fiber amplifier(YDFA)

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2007AA804303)

作者简介: 黄小东(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率脉冲传输、放大、整形的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ssam19840328@163.com

收稿日期: 2008-04-21; 收到修改稿日期: 2008-08-26

为 30dB。其中输入脉冲能量为几个纳焦耳,峰值功率约为 2W;经过 1 级放大器(单包层掺 Yb³⁺ 光纤放大器)后,脉冲峰值功率为 40W;然后经过 2 级放大器,当抽运功率为 1.4W 时,最后脉冲输出能量为 10μJ。

实验中,为了防止脉冲放大过程中脉冲产生畸变,将来进一步对脉冲功率进行提升,作者把输入脉冲进行了补偿,脉冲的前沿功率较低,后沿偏高,如图 2 所

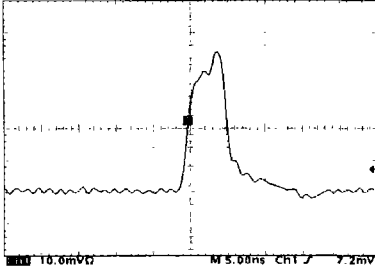


Fig. 2 The input pulse of YDFA

示。经过 1 级放大器后,脉冲能量得到提升,放大器的增益大约为 13dB,脉冲形状未发生任何改变,因此在 1 级放大器中,脉冲尚未达到饱和,如图 3 所示。而 1 级

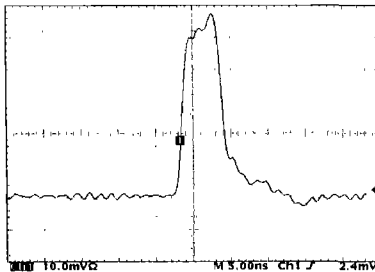


Fig. 3 The output pulse of YDFA

放大器的输出脉冲经过掺 Yb³⁺ 大模场光纤放大器的放大后,功率提升很快,经测量得到输出功率约为 2.4kW, 2 级大模场光纤放大器实现了 17dB 的增益,见图 4。

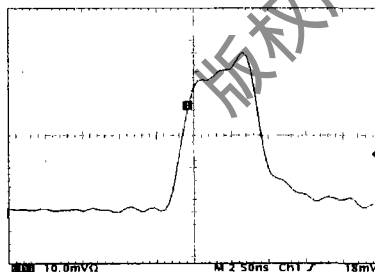


Fig. 4 The output pulse of the final amplifier

另外,实验中随着入纤抽运功率的增加,发现输出脉冲的能量变得十分不稳定,出现了能量远远高于信号脉冲的巨脉冲,这些新的脉冲的能量通常都在 100μJ 以上,而且出现的时间和重复频率也没有规律,如图 5 所示。巨脉冲的产生主要是因为光纤放大器的制作过程中没有对光纤的输出端面作角度研磨处理,光脉冲在光纤的两端面产生反射;从图 5 中可以看出,巨脉冲的出现时间大约距离信号脉冲的时间延迟约为 100ns,掺杂光纤的长度约为 10m,这样部分信号

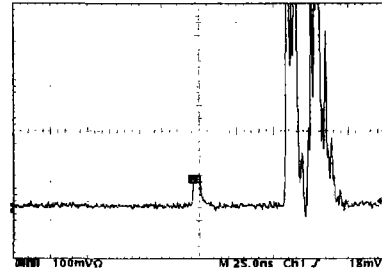


Fig. 5 The giant pulse in the amplifier

光被光纤的输出端反射回掺镜光纤中,再经过输入端的反射出时产生的时间延迟大约为: $\Delta t = 2 \frac{n_0 L}{c} = 100\text{ns}$,其中 n_0 是光纤纤芯的折射率, L 是掺镜光纤的长度, c 为真空中的光速。最后在观察到巨脉冲出现了几次后,发现掺镜光纤的输入端已经被严重打坏,说明掺镜光纤中出现了反射的激光。

2 基本理论分析

在周围基质电场的作用下,Yb³⁺ 的基态²F_{7/2}和激发态²F_{5/2}分裂成为多个斯塔克子能级,形成一个复杂的能级系统,其中激光上下能级的间隔比斯塔克子能级间隔大得多,而且粒子数在各个斯塔克能级达到热平衡分布的时间很短,一般可以当作两能级系统处理。通过假设近似,得到掺 Yb³⁺ 光纤放大器的速率方程如下:

$$\frac{dN_2(z,t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA} [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] \times$$

$$[P_p^+(z,t) + P_p^-(z,t)] - \frac{N_2(z,t)}{\tau} + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^K \lambda_k \times$$

$$[\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) - \sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] \times$$

$$[P^+(z,t, \lambda_k) + P^-(z,t, \lambda_k)] \quad (1)$$

$$N = N_1(z,t) + N_2(z,t) \quad (2)$$

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z,t)}{\partial t} = -\Gamma_p [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) -$$

$$\sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] P_p^\pm(z,t) - \alpha(\lambda_p) P_p^\pm(z,t) \quad (3)$$

$$\pm \frac{\partial P^\pm(z,t, \lambda_k)}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial P^\pm(z,t, \lambda_k)}{\partial t} = -\Gamma [\sigma_a(\lambda_p) N_1(z,t) -$$

$$\sigma_e(\lambda_p) N_2(z,t)] P^\pm(z,t, \lambda_k) - \alpha(\lambda_k) P^\pm(z,t, \lambda_k) +$$

$$2\sigma_e(\lambda_k) N_2(z,t) \frac{hc^2}{\lambda_k^3} \Delta\lambda \quad (4)$$

式中, N 为光纤中 Yb³⁺ 的掺杂浓度, N_1 和 N_2 分别为基态和上能级粒子数, $P_p(z,t)$ 为抽运光功率, A 为光纤纤芯的面积,光纤长度为 L ; λ_s, λ_p 分别为信号光和抽运光的波长, $\sigma_a(\lambda_p), \sigma_e(\lambda_p)$ 分别为抽运光的吸收截面和发射截面, $\sigma_a(\lambda_s), \sigma_e(\lambda_s)$ 分别为信号光的发射截面和吸收截面;把光谱区间 $[\lambda_1, \lambda_k]$ 分为 K 个区间,其中每个光谱区间的间隔为 $\Delta\lambda, P(z,t, \lambda_k)$ 为每个信道放大自发

辐射的能量(±分别代表前向和后向传输)。当考虑正向传输信号时, $P^+(z,t,\lambda_s)$ 表示了信号光功率。这是因为考虑到信号光所在的信道($k=s$, s 为多信道中的1个信道)至少要比该信道放大自发辐射功率高3个量级,这样该信道的放大自发辐射完全可以看作是信号的弱背景噪声,在考虑整个区间的放大自发辐射时,该信道的放大自发辐射不作考虑,即 $k \neq s$ 。

Table 1 Experiment and calculation parameters

parameters			
λ_p	980nm	τ	840 μ s
λ_s	1053nm	A	$1.76 \times 10^{-10} \text{m}^2$
λ_1	1001nm	N	5.5×10^{25}
λ_k	1111nm	α	3.0×10^{-3}
$\sigma_a(\lambda_p)$	$2.5 \times 10^{-24} \text{m}^2$	Γ_p	0.01
$\sigma_e(\lambda_p)$	$2.5 \times 10^{-24} \text{m}^2$	Γ	0.85
$\sigma_e(\lambda_s)$	$1.6 \times 10^{-25} \text{m}^2$	L	10m
$\sigma_a(\lambda_s)$	$2.3 \times 10^{-28} \text{m}^2$	$\Delta\lambda$	2nm

3 数值模拟分析及讨论

已经有很多人对(1)式~(4)式的稳态求解进行了深入的研究,对其稳态情况下放大器中反转粒子数、小信号增益、以及放大自发辐射的分布状况也进行了详细的阐述。实际上,为了更加精确地描述脉冲在掺 Yb^{3+} 光纤放大器中的传输、放大,对(1)式~(4)式的瞬态求解变得非常重要,一般采用的是有限差分的方法。

利用表1中给出的有关参量,假设输入脉冲信号为高斯脉冲,结合相应的初始、边界条件:

$$P_p^+(0,t) = 1.4 \quad (5)$$

$$P_p^-(L,t) = 0 \quad (6)$$

$$P^+(0,t,\lambda_s) = 40 \exp[-t^2/(2t_0^2)] \quad (7)$$

$$P^-(L,t,\lambda_k) = 0 \quad (8)$$

$$P^+(0,t,\lambda_k) = 0, P^-(L,t,\lambda_k) = 0, \quad k = 1 \cdots K (k \neq s) \quad (9)$$

式中, $N_1(z,0), N_2(z,0), P^+(z,0,\lambda_k) (k \neq s)$ 通过求解稳态条件下的速率方程(1)式~(4)式得到。对脉冲在放大器中的传输放大情况进行了简单的模拟。图6为输入脉冲信号,其峰值功率为40W,脉冲宽度为4ns。图

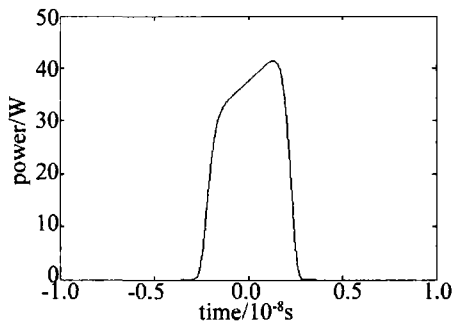


Fig. 6 The simulated input pulse

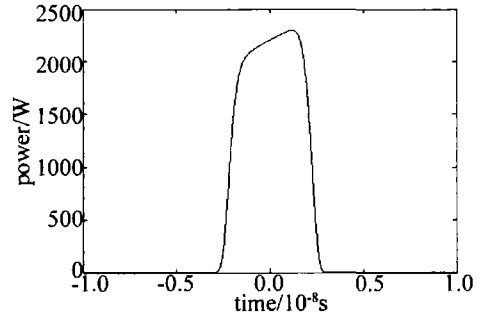


Fig. 7 The calculated output pulse

7为模拟经过光纤放大器后的输出脉冲。可以看出,信号脉冲经过10m的高掺 Yb^{3+} 浓度光纤放大,输出峰值功率约为2.3kW,与前面的实验结果基本相符。另外,输出脉冲形状发生了略微的畸变,脉冲前沿获得更高的增益。主要因为脉冲在光纤中传输时前沿总是被更多的反转粒子放大,故前沿消耗了一定的反转粒子,使得后沿不能被完全放大。为得到想要的脉冲波形,通常在放大器的输入端对注入脉冲进行补偿。

4 结论

采用2级光纤放大器对信号进行放大,并且简单地在大模场光纤放大器中脉冲信号的放大进行了模拟,发现实验结果与模拟结果吻合较好。另外,在光纤的输出端发现随着抽运功率的增加,产生了能量远高于信号光脉冲的巨脉冲,可以看出掺 Yb^{3+} 大模场光纤中还有相当多的能量没有被信号光提取,因此可以改进光纤放大器的设计,在光路中加入环形器可以使信号光在光纤中传输两次,这样可以充分地提取光纤中的能量,得到更高的增益。

参考文献

- [1] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [2] WANG Y, PO H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifier for high-power pulse amplification [J]. IEEE J Q E, 2003, 21(10): 2262-2270.
- [3] LU X Q, CHEN Sh H. Ytterbium-doped fiber amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, A28(3): 209-214 (in Chinese).
- [4] HUANG J, LÜ X J, LI F, *et al.* Simulation characteristics of Yb^{3+} -doped double-clad fiber amplifier for 1053nm pulse amplification [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(8): 1022-1026 (in Chinese).
- [5] XU D P, LI M Zh, LÜ X J, *et al.* Numerical simulation of characteristics of high power ytterbium-doped double-clad fiber amplifier [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1071-1076 (in Chinese).
- [6] ZHAN Y, ZHENG Y, ZHAO Y H, *et al.* The gain and noise characteristics of double cladding ytterbium-doped fiber amplifiers at different pump modes [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 50-53 (in Chinese).
- [7] AN W, MING H, XU L X. Experiment of Yb-doped fiber laser pulse amplifier [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2002, 19(3): 254-257 (in Chinese).
- [8] WANG A T, XU L X, MING H, *et al.* Experiment study of single frequency Yb-doped fiber amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, A29(9): 777-779 (in Chinese).