

## 全光纤化高功率线偏振掺镱脉冲光纤激光器

王立新<sup>1,2</sup>, 蔡 军<sup>2</sup>, 姜培培<sup>3</sup>, 沈永行<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 燕郊 065201; 3. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 建立了双包层调  $Q$  光纤激光器的速率方程, 并利用一个全光纤化的声光调  $Q$  光纤激光器作为种子源, 双包层掺镱保偏光纤作为增益介质, 研制了一个全光纤化的高功率线偏振掺镱脉冲光纤激光器。在泵浦功率 38.4 W, 偏振种子激光功率 0.6 W, 重复频率 40 kHz, 脉冲宽度为 30 ns 时, 获得了偏振激光输出 29.8 W, 偏振消光比大于 10 dB。在高功率输出时, 激光光束质量因子 ( $M^2$ ) 达到了 1.32。

**关键词:** 线偏振; 脉冲掺镱光纤激光器; 全光纤化

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0350-05

## All fiberized high power linear polarized pulsed ytterbium-doped fiber laser

Wang Lixin<sup>1,2</sup>, Cai Jun<sup>2</sup>, Jiang Peipei<sup>3</sup>, Shen Yonghang<sup>3</sup>

(1. School of Electro-Optical, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Yanjiao 065201, China;  
3. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on the rate equations, a numerical model of double clad  $Q$ -switched fiber laser was built, and the all fiberized high power linear polarized pulsed ytterbium-doped fiber laser was developed by using a fiberized acousto-optic  $Q$ -switched fiber laser as the seed source, a double clad ytterbium-doped fiber as the gain medium. In the pump power of 38.4 W, repetition rate of 40 kHz, pulse duration time of 30 ns, the laser delivered a linearly polarized pulsed emission output with an average power of 29.8 W. Its polarization extinction ratio was greater than 10 dB, and the beam quality factor ( $M^2$ ) was 1.32.

**Key words:** linear polarization; pulsed ytterbium-doped fiber laser; all fiberized

## 0 引言

近年来,脉冲光纤激光器以其效率高、脉冲窄、能量高、光束质量好等诸多优点而倍受业界青睐,在非线形光学、工业加工、激光雷达、医疗等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。常规的光纤激光器需要将泵浦光耦合进入到直径低于 10 μm 的单模纤芯,耦合效率较低,很难实现高功率的激光输出。文中选用掺镱的双包层光纤作为增益介质,泵浦光在内包层中传输,因其内包层具有较大的数值孔径和横向尺寸,故可以采用多模 LD 阵列作为泵浦源,容易实现高功率的激光输出。

目前,使用双包层的光纤激光器在连续的工作模式下,已获得了千瓦级功率输出<sup>[5-7]</sup>。但在脉冲模式下工作的双包层光纤激光器容易产生受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)等非线性现象,从而造成光纤损坏<sup>[8-11]</sup>,其输出平均功率远不及连续的光纤激光器。特别是线偏振脉冲光纤激光器,由于产生非线性效应的阈值更低,很难获得高功率输出,因此高功率线偏振脉冲光纤激光器的研制具有较高的挑战性。目前,国内外已有多家研究机构报道了相关方面的工作,但其大部分都具有空间性元件<sup>[12-15]</sup>。文中报道了一种全光纤结构的高功率线偏振脉冲光纤激光器。该激光器采用声光调 Q 的全光纤结构的脉冲光纤激光器作为种子,其输出功率为 2W,种子激光经过一个保偏隔离器后,获得了 0.6W 的偏振种子激光输出。利用双包层保偏掺镱增益光纤作为增益介质,将种子激光经过一级放大后获得了最大 29.8W 功率的脉冲激光输出,其偏振消光比大于 10 dB。

## 1 理论模型

双包层调 Q 光纤激光器由泵浦源、光学谐振腔(腔镜为光纤的端面)、双包层增益光纤和 Q 开关构成。由于光纤激光器增益光纤长度通常较长(一般为几米),Q 开关的长度、光纤与腔镜之间的距离相对增益光纤长度可以忽略,则谐振腔的长度为增益光纤的长度。用(x,y,z)代表谐振腔的空间位置,用 z 代表光纤轴,反转粒子数密度和光子密度的速率方程建立如下<sup>[16]</sup>:

$$\frac{d[\Delta N(x,y,z,t)]}{dt} = -\frac{c\sigma}{n_1} \sum_{i=1}^n s_i(x,y,z,t)\Delta N(x,y,z,t) \quad (1)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{c\sigma}{n_1} \iint \Delta N(x,y,z,t)s_i(x,y,z,t)dx dy dz - \frac{S_i}{\tau_c} \quad (2)$$

式中: $\Delta N(x,y,z,t)$ 为 t 时刻的反转粒子数密度; $S_i(x,y,z,t)$ 为 t 时刻的第 i 个激光横模的光子密度; $n_1$ 为光纤纤芯的有效折射率; $c$ 为光速; $n$ 代表激光横模的个数; $\sigma$ 为受激发射截面积; $\tau_c=2l \cdot n_1/c\delta_i$ 为光子寿命; $l$ 为腔长(增益光纤的长度); $\delta_i$ 为第 i 个激光横模的往返损耗。

假设激光器信号光为单横模,即  $i \neq 1$  时,  $S_i=0$ 。由公式(1)、(2)得出,任意时刻的信号光光子数密度与反转粒子数密度的关系如下:

$$S_i = \Delta N_i \ln \frac{\Delta N}{\Delta N_m} - (\Delta N - \Delta N_m) \quad (3)$$

式中: $\Delta N_i = \frac{\delta_i}{2\sigma} \frac{A_f}{F}$ 为反转粒子数密度的阈值; $F = \sum_{m,l} \rho_{m,l} F_{vuml}$ 为信号光与泵浦光之间的填充系数; $A_f = \pi a^2$ 为纤芯截面积; $a$ 为纤芯半径; $\Delta N$ 为调 Q 脉冲开始时的反转粒子数密度。对多模泵浦: $F = \sum_{m,l} \rho_{m,l} F_{vuml}$ , ( $m,l$ )为泵浦光模式, ( $v,u$ )为信号光模式,  $\rho_{m,l}$ 为泵浦模能量占总泵浦能量的百分比。在单横模工作条件下,对于给定的泵浦光和信号光频率,该填充系数仅由增益光纤的归一化频率决定。

在调 Q 脉冲完成时,谐振腔内信号光光子数为 0。由公式(3)得,增益光纤内剩余的反转粒子数密度  $\Delta N_f$  为:

$$\frac{\Delta N_f}{\Delta N_m} = 1 + \frac{\Delta N_i}{\Delta N_m} \ln \frac{\Delta N_f}{\Delta N_m} \quad (4)$$

从而得到双包层调 Q 光纤激光器的初始反转粒子数密度为:

$$\Delta N_m = \frac{\tau_f}{h\nu_p} \cdot P_p [1 - \exp(-\alpha' L)] \quad (5)$$

阈值功率为:

$$P_1 = S_1 h\nu_s \frac{cT_1}{2l \cdot n_1} \quad (6)$$

瞬时功率为:

$$P_{th} = \frac{h\nu_p}{\sigma\tau_f} \frac{\delta_i}{2} \frac{A_f}{F} \quad (7)$$

峰值功率为:

$$P_{peak} = h\nu_s \frac{cT_1}{2l \cdot n_1} \left[ \Delta N_t \ln \frac{\Delta N_t}{\Delta N_{in}} - (\Delta N_t - \Delta N_{in}) \right] \quad (8)$$

式中:  $\tau_j$  代表上能级粒子寿命;  $\alpha_a'$ 、 $P_p$ 、 $V_p$  分别代表泵浦光有效吸收系数、功率和频率。

## 2 实验布置

全光纤化高功率线偏振脉冲掺镱光纤激光器实验布置如图 1 所示。种子激光器为一个全光纤化的声光调  $Q$  光纤激光器, 种子激光器输出的激光是随机偏振的, 为了产生线偏振光, 在种子激光器输出端熔接一个与其模式匹配的、偏振相关的光纤隔离器, 同时, 起到避免放大级激光反射回种子激光器引起破坏的作用。

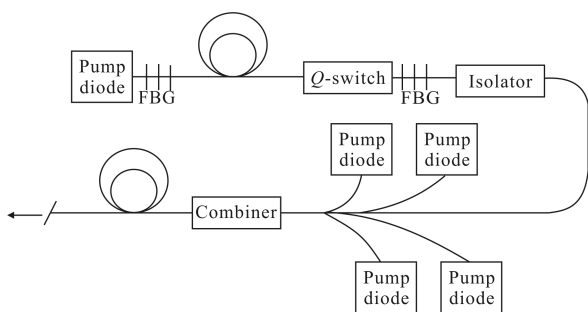


图 1 光纤激光器系统结构

Fig.1 Schematic of the fiber laser

激光谐振腔采用一对光纤布拉格光栅 (FBG) 组成线性谐振腔结构, 泵浦光输入端 FBG 反射率为 99.9%, 输出端 FBG 反射率为 10%。种子激光器以 1 m 长的掺镱双包层光纤 ((纤芯和包层直径分别为  $7 \mu\text{m}$  和  $125 \mu\text{m}$ ) 作为增益光纤, 以两端为光纤输出的声光开关作为调制器件。泵浦激光器为 915 nm 的多模半导体激光器, 其最大输出功率为 10 W, 输出光纤为  $105 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$  多模光纤 (JDSU)。声光开关的调  $Q$  频率在 20 kHz 至 50 kHz 间可调。

## 3 实验结果与讨论

在泵浦功率为 5 W 时, 获得了种子非偏振激光输出 2 W, 在继续提高泵浦功率的情况下, 种子激光产生了 SRS 非线性效应。由于 2 W 的种子激光已经足够实现后续功率的有效放大, 因此笔者没有让其满负荷工作, 其光谱图如图 2 所示。

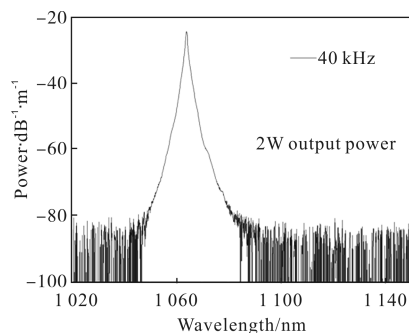


图 2 种子激光输出光谱

Fig.2 Output spectra of the seed laser

种子激光器输出的激光经过一个偏振隔离器后输入下一级放大, 经过偏振隔离器获得了 0.6 W 的偏振种子激光输出。放大级采用一级放大结构, 增益光纤为大模场双包层掺镱光纤, 其纤芯大小为  $29 \mu\text{m}$  (数值孔径为 0.07), 内包层大小为  $250 \mu\text{m}$  (数值孔径为 0.47)。在泵浦波长为 915 nm 时, 光纤的包层吸收系数为 2.2 dB/m, 因此光纤长度选择为 5 m。为了获得较好的光束质量, 我们将光纤盘成一个直径为 11 cm 的圆。为了防止端面反射引起光纤放大器损坏, 光纤输出端抛光为  $8^\circ$ 。采用偏振隔离器防止激光的后向反射, 从而避免种子激光器被损坏。利用一个  $(6+1) \times 1$  的高功率激光合束器将种子激光与泵浦激光耦合进入增益光纤。泵浦激光器为 4 个工作波长为 915 nm 的多模半导体激光器, 其输出功率最大可达 10 W。

在重复频率为 40 kHz, 泵浦功率 38.4 W, 偏振种子激光为 0.6 W 时, 最大获得了 29.8 W 的偏振激光输出。图 3 给出了泵浦激光功率与输出激光功率的关系图, 光纤放大器整体斜效率约为 77%。

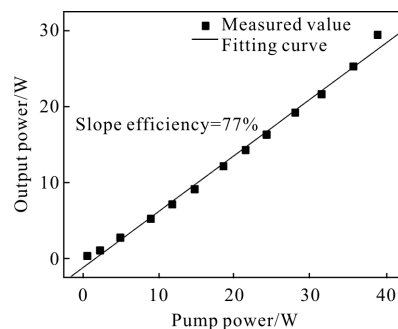


图 3 泵浦功率与输出功率关系

Fig.3 Pump power versus output average power

激光输出的偏振消光比为 91.7% (10.2 dB), 在输

出激光功率为 20 W 时,利用刀口法测量激光光束质量,得到其  $M^2$  为 1.32。利用高频示波器笔者测量了激光输出脉冲,在重复频率为 40 kHz 时,其输出脉冲宽度被压缩为 30 ns 左右,如图 4 所示。

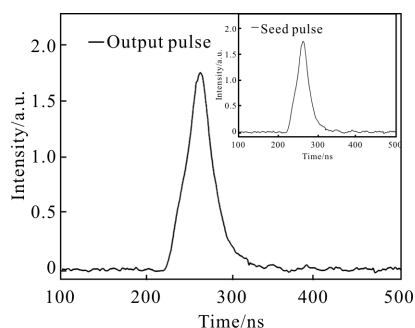


图 4 激光器输出脉冲

Fig.4 Pulse shapes of output laser and seed laser

受激拉曼散射(SRS)的产生主要与脉冲峰值功率有关。在同一泵浦功率下,重复频率越高,峰值功率越低。因此,在保证种子源功率的前提下,尽量使用较高的重复频率。在重复频率为 40 kHz,不同泵浦功率下的激光输出光谱图,如图 5 所示。从光谱图中可以看出,在激光放大过程中,没有出现非线性效应(SRS 和 SBS)。通过对不同功率的激光光谱比较,可以发现,同固体种子激光器相同,在同一重复频率下,泵浦功率越高,脉冲峰值功率越高。

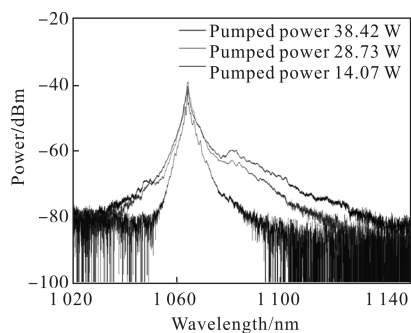


图 5 不同功率下激光器输出光谱

Fig.5 Laser spectra of different output power

## 4 结论

介绍了全光纤化高功率线偏振脉冲掺镱光纤激光器的初步研究工作。采用全光纤结构声光调 Q 激光器作为种子光源,其光谱带宽较宽,可以有效的增加 SRS 和 SBS 等非线性效应的阈值,因此能够得到较高功率的放大激光脉冲输出。文中研究的高功率

线偏振脉冲光纤激光器,在光学参量振荡(OPO)等非线性激光频率变换、激光医疗等多个领域具有广泛的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian, et al. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulsed [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(12): 1603-1606. (in Chinese)
- [2] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang et al. Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138. (in Chinese)
- [3] Zhao Shanghong, Zhan Shengbao, Shi Lei, et al. High Power Fiber Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2010: 179-225. (in Chinese)
- [4] Piper A, Malinowski A, Furusawa K, et al. High-power, high-brightness, mJ Q-switched ytterbium-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(15): 928-929.
- [5] Li J, Ueda K, Shirakawa A, et al. 39-mW annular excitation of ytterbium fiber laser with radial polarization[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(11): 814-818.
- [6] Limpert J, Höfer S, Liem A, et al. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2002, 75(4-5): 477-479.
- [7] Gong M, Peng B, Liu Q, et al. Novel Q-switching method with mechanical all-fiber module [J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(10): 733-736.
- [8] Ye C, Yan P, Huang L, et al. Stimulated Brillouin scattering phenomena in a nanosecond linearly polarized Yb-doped double-clad fiber amplifier [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 45: 376-381.
- [9] Babin S A, Churkin D V, Ismagulov A E, et al. Single frequency single polarization DFB fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(6): 428-432.
- [10] Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang, et al. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1119-1120. (in Chinese)
- [11] Zhao Yuhui, Zheng Yi. High-power Yb-doped Double-clad Fiber Laser[J]. *Laser and Infrared*, 2006, 36(9): 833-836. (in Chinese)
- [12] Xu Jiangming, Leng Jinyong. All-fiber high power 1091nm MOPA Laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2143-2146. (in Chinese)
- [13] Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan, et al. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture [J].

- Chinese J Lasers*, 2009, 36(8): 1932–1936. (in Chinese)
- [14] Alvarez-Chavez J A, Martínez-Rios A, Torres-Gomez I, et al. Wide wavelength-tuning of a double-clad Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser based on a fiber Bragg grating array [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(12): 880–883.
- [15] Jia Xiujie, Guo Zhancheng, Fan Wandu, et al. Development of completely homemade Yb-doped double-cladding fiber laser with high-power [J]. *Acta Scientiarum Naturalium (Universitatis Nankaiensis)*, 2007, 40(2): 87–90. (in Chinese)
- [16] Gaeta C J, Dignonnet M J F, Shaw H J. Pulse characteristics of Q-switched fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(12): 1645–1651.