

文章编号: 0258-7025(2003)09-0783-05

1064 nm 抽运掺铥光纤放大器增益特性的理论研究

蒙红云, 武志刚, 高伟清, 张昊, 袁树忠, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 从掺铥光纤放大器的速率方程组和光传输方程出发, 引入光场与掺杂分布的重叠因子, 利用数值法分别模拟计算了光纤掺杂浓度、长度和抽运功率等参数对放大器增益的影响, 并计算了一定掺杂浓度和抽运功率下的最佳光纤长度及其对应的增益, 分析了该类放大器增益随输入信号功率的变化关系, 并计算了其功率转换效率。

关键词 光电子学; 掺铥光纤放大器; 饱和增益; 功率转换

中图分类号 TN 253; TN 929. 11 **文献标识码** A

Theoretical Studies on the Gain Characteristics for 1064 nm-pumped Thulium-doped Fiber Amplifier

MENG Hong-yun, WU Zhi-gang, GAO Wei-qing,

ZHANG Hao, YUAN Shu-zhong, DONG Xiao-yi

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

Abstract A group of equations deduced from TDFA (thulium-doped fiber amplifier) rate equations and light propagation equations, introducing the overlapping factors between the (pump and signal) light intensities and the thulium dopant distributions inside the fiber core, is presented in this paper. Using the group of equations, the gain characteristics of the amplifier are calculated.

Key words optoelectronics; thulium-doped fiber amplifier; saturation gain; power conversion efficiency

1 引言

随着波分复用系统的发展, 拓宽光纤放大器的可用带宽显得越来越重要。而传统掺铒光纤放大器(C-EDFA)只有 35 nm(1525~1560 nm)的带宽, 仅覆盖石英单模光纤低损耗窗口(1450~1650 nm)的一部分, 在 1480~1530 nm 范围内损耗大约为 0.24 dB/km, 仅次于 C-EDFA 波段的 0.22 dB/km。因此, 近几年开拓短波段(S-波段, 1450~1530 nm)光纤放大器成了光通信器件研究的热点之一。

人们对 S-波段光纤放大器(氟化物掺铥光纤放大器)报道了不少的实验结果^[1~6], 但是理论研究较少见, T. Komukai 等首次研究了氟化物掺铥光纤

放大器的速率方程, 并从理论和实验上研究了不同光纤参数对放大器的增益、阈值、抽运效率和噪声特性的影响^[7]。W. J. Lee 等从速率方程出发, 研究了 1060 nm 左右不同抽运光波长对放大器增益和噪声特性的影响^[8]。本文引入光场与掺杂分布的重叠因子, 从掺铥光纤放大器的速率方程组和光传输方程出发, 通过理论计算, 对放大器增益随光纤长度、抽运功率的变化, 最佳光纤长度与光纤掺杂浓度、抽运功率的关系, 以及放大器随输入功率的变化等特性进行了分析和讨论。

2 理论分析

铥离子的能级示意图如图 1 所示, 由于 3H_4 能

收稿日期: 2002-05-09; 收到修改稿日期: 2002-07-09

作者简介: 蒙红云(1973—), 男, 江西人, 现为南开大学现代光学研究所学生, 博士, 主要从事光纤放大器和全光纤通信方面的研究。E-mail: hymeng@eyou.com

级寿命(1.35 ms)比 3F_4 能级寿命(9.0 ms)短得多,很难实现粒子数反转,所以掺铥光纤放大器常采用图1所示的上转换抽运方式。基态粒子吸收抽运光从 3H_6 态被激发到激发态 3F_4 ,处于 3F_4 能级的粒子再吸收抽运光被激发到更高的激发态 3H_4 。这样,在抽运光不停地作用下, 3H_4 和 3F_4 之间就可形成粒子数反转。由于 ${}^3H_4 \rightarrow {}^1G_4$ 的吸收不可忽略,因此速率方程中必须考虑高级激发态吸收,这在掺铥光纤放大器中是不应考虑的。

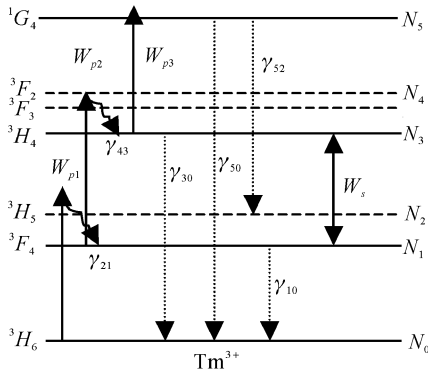


图1 Tm^{3+} 能级示意简图

Fig. 1 Energy level diagram of Tm^{3+} ion

考虑均匀展宽情况,假定1470 nm带受激发射截面 σ_s^e 和吸收截面 σ_s^a 相等,即 $\sigma_s^e = \sigma_s^a = \sigma^s$,则速率方程可表示为^[7,8]

$$\frac{dN_0}{dt} = -W_{p1}N_0 + \gamma_{10}N_1 + \gamma_{30}N_3 + \gamma_{50}N_5 \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(\gamma_{10} + W_{p2} + W_s)N_1 + \gamma_{21}N_2 + W_sN_3 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{p1}N_0 - \gamma_{21}N_2 + \gamma_{52}N_5 \quad (3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_sN_1 - (\gamma_{30} + W_s + W_{p3})N_3 + \gamma_{43}N_4 \quad (4)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = W_{p2}N_1 - \gamma_{43}N_4 \quad (5)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = W_{p3}N_3 - (\gamma_{50} + \gamma_{52})N_5 \quad (6)$$

式中 $N_i = N_i(r, \phi, z, t)$, $i = 0, 1, \dots, 5$ 分别为图1所示的不同能级的粒子数密度; $W_{pi} = I_p \sigma_{pi}^a / (h\nu_p)$ ($i = 1, 2, 3$), $W_s = I_s \sigma^s / (h\nu_s)$, $\gamma_{30} = 1/\tau_3$, $\gamma_{10} = 1/\tau_1$, 其中 $h\nu_p$, $h\nu_s$ 分别表示抽运光和信号光的光子能量, σ_{pi}^a 代表不同态对抽运光的吸收截面, τ_1 和 τ_3 分别为 3F_4 和 3H_4 能级寿命。

由于处于 3F_2 和 3H_5 能级的粒子很快被衰减掉,

因此 N_2 和 N_4 很小,可以忽略不计,总粒子数密度 N 就可表示为

$$N = N_0 + N_1 + N_3 + N_5 \quad (7)$$

假设抽运光和信号光沿 z 方向传播,忽略光纤损耗,考虑前向抽运的情况下,传输方程为

$$\frac{dI_s}{dz} = (\sigma_s^e N_3 - \sigma_s^a N_1) I_s \quad (8)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -(\sigma_{p1}^a N_0 + \sigma_{p2}^a N_1 + \sigma_{p3}^a N_3) I_p \quad (9)$$

引入重叠因子^[9],在稳态条件下,即 $\frac{dN_i(z, t)}{dt} = 0$,

对(1)~(6)式两边作横向积分并经过变形,得到

$$-\frac{\sigma_{p1}^a \Gamma_p P_p(z)}{A_c h\nu_p} N_0 + \gamma_{10} N_1 + \gamma_{30} N_3 + \gamma_{50} N_5 = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_{p1}^a \Gamma_p P_p(z)}{A_c h\nu_p} N_0 - \left[\gamma_{10} + \frac{\sigma_{p2}^a \Gamma_p P_p(z)}{A_c h\nu_p} + \frac{\sigma^s \Gamma_s P_s(z)}{A_c h\nu_s} \right] N_1 + \frac{\sigma^s \Gamma_s P_s(z)}{A_c h\nu_s} N_3 + \gamma_{52} N_5 = 0 \quad (11)$$

$$\left[\frac{\sigma_{p2}^a \Gamma_p P_p(z)}{A_c h\nu_p} + \frac{\sigma^s \Gamma_s P_s(z)}{A_c h\nu_s} \right] N_1 - \left[\gamma_{30} + \frac{\sigma^s \Gamma_s P_s(z)}{A_c h\nu_s} \right] N_3 - (\gamma_{50} + \gamma_{52}) N_5 = 0 \quad (12)$$

对(8)和(9)两式两边作横向积分,得到

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s (\sigma_s^e N_3 - \sigma_s^a N_1) P_s(z) \quad (13)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p (\sigma_{p1}^a N_0 + \sigma_{p2}^a N_1 + \sigma_{p3}^a N_3) P_p(z) \quad (14)$$

其中, A_c 表示纤芯掺铥有效面积, $P_p(z)$ 和 $P_s(z)$ 分别表示沿光纤 z 处的抽运功率和信号功率。由(7)及(10)~(12)求出 N_1, N_2, N_3 ,然后代入(13)和(14)式,利用数值法,即可模拟放大器的增益特性。

3 数值模拟

假设掺铥光纤放大器采用氟化物(ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF)光纤,计算中所用参数为: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $\nu_p = 2.82 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ($\lambda_p = 1064 \text{ nm}$), $\nu_s = 2.041 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ($\lambda_s = 1470 \text{ nm}$), 设 $\Gamma_p = \Gamma_s = 0.45$, $A_c = 1.26 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ($a = 2.0 \text{ } \mu\text{m}$), 小信号功率为 $1 \text{ } \mu\text{W}$, 大信号功率为 1 mW 。下列数据引自文献^[7], $\sigma_{p1}^a = 1.1 \times 10^{-27} \text{ m}^2$, $\sigma_{p2}^a = 8.2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\sigma_{p3}^a = 9 \times 10^{-26} \text{ m}^2$, $\sigma^s = 6.7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$, $\gamma_{10} = 108.6 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{30} = 594.6 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{50} = 491.8 \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{52} = 384.4 \text{ s}^{-1}$ 。

3.1 增益

沿光纤长度任何位置,放大器对信号的放大倍数可以表示为 $G(z) = P_s(z)/P_s(0)$, 若用 dB 来表示, 则称为增益。图 2(a)和(b)分别表示在一定掺杂浓度、不同抽运功率下,小信号增益和大信号增益沿光纤长度的变化关系。图 3(a)和(b)分别表示在一定抽运功率、不同掺杂浓度下,小信号增益和大信号增益沿光纤长度的变化关系。从图 2 和图 3 中可以看出,增益沿光纤长度并不是线性增长的。在一定范围内,增益随光纤长度增长而增大,当光纤达到

某一长度时,增益有最大值,然后随光纤长度的继续增大,增益变小。掺杂浓度越大,抽运功率越小,出现增益最大值需要的光纤越短,即最佳光纤长度越短。不同掺杂浓度的光纤,在一定抽运功率下,虽然所需要的光纤长度不同,但是从图 3 可以看出,它们的最大增益是一样的。这说明,只要抽运功率一定,采用不同掺杂浓度相应长度的光纤能得到同样的效果。由于基态吸收截面比较小,而且存在高级激发态吸收,因此该类放大器的增益比较小。

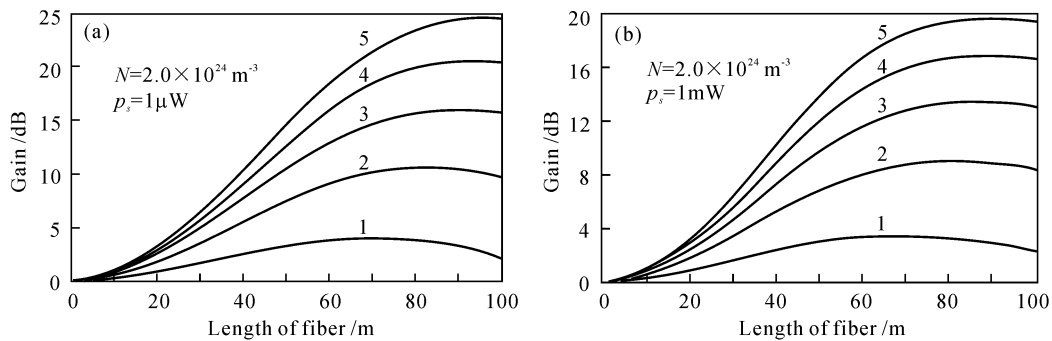


图 2 相同掺杂浓度、不同抽运功率下,信号增益沿光纤长度的变化

Fig. 2 Gain versus fiber length for same concentration and different pump powers

(a) small signal; (b) big signal. 1; $P_p = 20 \text{ mW}$, 2; $P_p = 40 \text{ mW}$, 3; $P_p = 60 \text{ mW}$, 4; $P_p = 80 \text{ mW}$, 5; $P_p = 100 \text{ mW}$

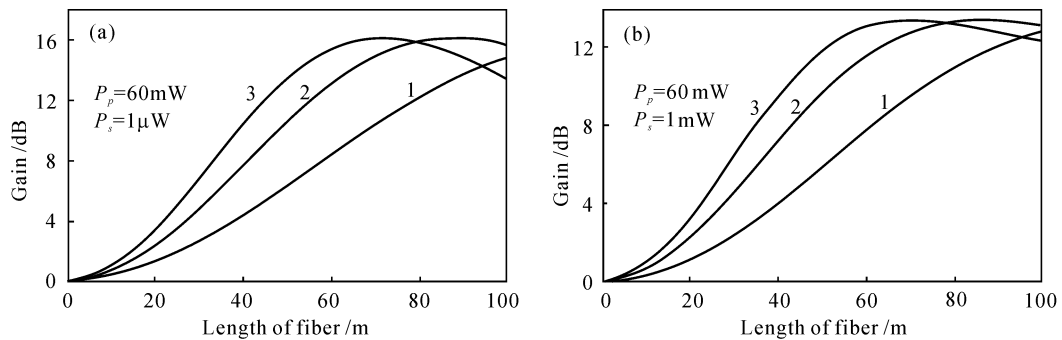


图 3 相同抽运功率、不同掺杂浓度下,增益沿光纤长度的变化

Fig. 3 Gain versus fiber length for same pump power and different concentration

(a) small signal; (b) big signal. 1; $N = 1.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 2; $N = 2.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 3; $N = 3.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$

3.2 最佳光纤长度

放大器增益随光纤长度的变化而变化。在一定范围内,增益随光纤长度的增大而增大,达到最大值后,随光纤长度的继续增大而减小,把增益最大对应的光纤长度定义为最佳光纤长度。图 4(a)和(b)分别表示不同掺杂浓度时,小信号和大信号输入情况下,最佳光纤长度随抽运功率的变化。从图中可以看出,抽运功率越小、掺杂浓度越高,最佳光纤长度越短。图 5(a)和(b)分别表示不同掺杂浓度,最佳光纤长度时,小信号和大信号增益随抽运功率的变

化关系,可以看出,不论是小信号还是大信号,当抽运功率一定时,在不同掺杂浓度光纤所对应的最佳长度下,都有相同的增益,这与 3.1 节是相符的。

3.3 增益饱和与饱和输出功率

在小信号工作区,增益与信号光输入功率的大小无关,恒为常数,但是当输入功率增大到超出小信号工作区时,增益将随输入功率的增大而变化,出现增益饱和或压缩。饱和输出功率 $P_{\text{sat}}^{\text{out}}$ 通常定义为小信号增益 G_{max} 跌落或压缩 3 dB 时对应的输出信号光功率,它是光纤放大器特别是用做功率放大器时

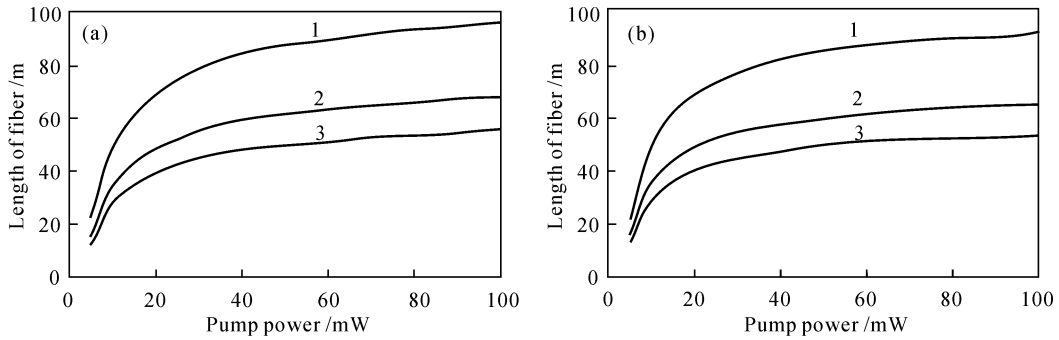


图 4 最佳光纤长度与抽运功率、掺杂浓度的关系

Fig. 4 Optimum fiber length versus pump power for different concentration

(a) small signal; (b) big signal. 1: $N = 1.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 2: $N = 2.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 3: $N = 3.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$

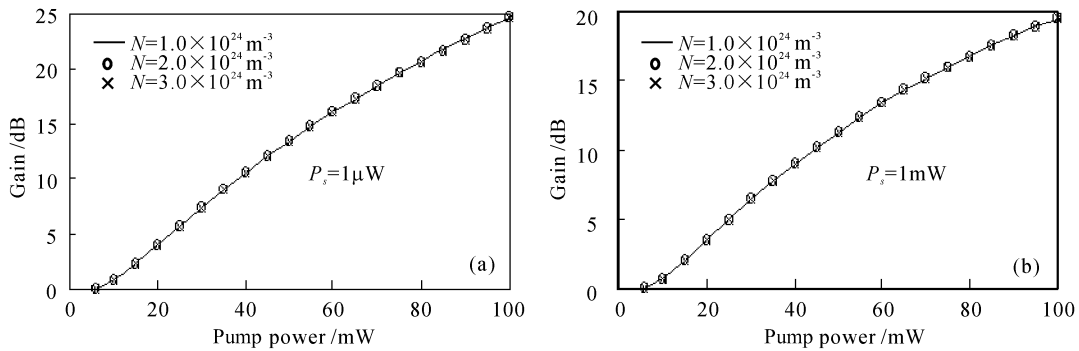


图 5 最佳长度时,增益与抽运功率的关系

Fig. 5 Gain as a function of pump power at optimization fiber length

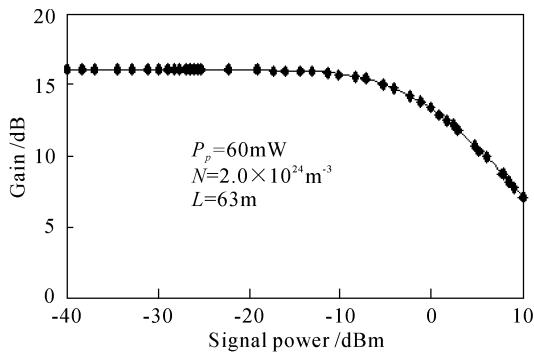


图 6 增益随输入信号功率的变化

Fig. 6 Gain as a function of input signal power

的重要参数。图 6 表示最佳光纤长度时,增益随输入信号功率的变化关系。从图中可以看出,当输入功率较小时,放大器的增益不变,而当输入功率增大到一定值时,增益随输入功率的增大而减小。当输入信号功率为 1.13 mW 时,增益下降了 3 dB,这时的增益为 13.13 dB,由此可以得到,放大器的饱和输出功率为 $P_{\text{sat}}^{\text{out}} = 23.15 \text{ mW}$,功率转换效率为 36.7%。由于文中忽略了放大自发辐射和光纤损

耗、插入损耗等,因此增益、功率转换效率等都比实验中要偏高。

参 考 文 献

- 1 T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa *et al.*. 1.47 μm band Tm^{3+} doped fluoride fibre amplifier using a 1.064 μm upconversion pumping scheme [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1):110~112
- 2 R. M. Percival, J. R. Williams. Highly efficient 1.064 μm upconversion pumped 1.47 μm thulium doped fluoride fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(20):1684~1685
- 3 S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori *et al.*. Tm -doped fiber amplifiers for 1470-nm-band WDM signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(10):1331~1333
- 4 Tadashi Kasamatsu, Yutaka Yano, Takashi Ono. Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1.48 ~ 1.51- μm wavelength region [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(1):31~33
- 5 Tadashi Kasamatsu, Yutaka Yano, Takashi Ono. Laser-diode-pumped highly efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480~1510-nm band [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5):433~435

- 6 F. Roy, F. Leplingard, L. Lorcy *et al.*. 48% power conversion efficiency in single pump gain-shifted thulium-doped fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37** (15):943~945
- 7 Tetsuro Komukai, Takashi Yamamoto, Tomoki Sugawa *et al.*. Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11):1880~1889
- 8 Won Jae Lee, Bumki Min, Jaehyoung Park *et al.*. Study on the pumping wavelength dependency of S⁺-band fluoride based thulium doped fiber amplifiers [C]. OFC'01, TuQ5, 2001
- 9 Du Geguo, Chen Guofu. Theoretical studies on the gain characteristics for 980-nm pumped erbium-doped fiber amplifier [J]. *Science in China (Series A)* (中国科学(A辑)), 1998, **28**(6):535~541 (in Chinese)

双端包层抽运光纤激光器实现 30 W 激光输出

采用包层抽运技术的双包层光纤激光器能够在内包层中注入高的抽运功率,从而可以获得高功率的激光输出。内包层的非圆对称结构可以使绝大部分抽运光多次通过掺杂稀土元素的纤芯,足够长度的光纤能够使抽运光充分吸收,因此能够获得接近量子极限的光-光转换效率。此外,其面积-体积比很大,纤芯内高功率的激光产生的热量很容易通过光纤表面散出,即使在高功率情况下也无需对其谐振腔进行强制冷却。纤芯的限制使高功率激光输出时也能保证高的光束质量。这些特点使高功率双包层光纤激光器成为新一代激光器件,在高精度激光加工、激光医学、激光雷达技术、空间技术等领域中逐渐成为主导力量。

最近,我们在原来 10 W 级单端抽运掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器研究的基础上,在输出端增加了一个 LD 抽运源,从而实现了对双包层光纤的双端包层抽运,获得了准直的 30 W 稳定光纤激光功率输出。

双包层光纤为 D 型结构,内包层数值孔径 0.37,纤芯掺杂 Yb³⁺。所用的抽运源之一为中心波长 980 nm 的尾纤输出 LD,通过特殊设计的光学耦合透镜组将尾纤出射的抽运光经过一双色片注入双包层光纤的 D 型内包层。另一抽运源为准直输出的大功率 LD 模块,通过特殊设计的光学耦合透镜组聚焦后注入双包层光纤激光输出端内包层。在准

直 LD 模块和聚焦耦合透镜组之间有一片与光路成一定倾角的双色片用来将光纤激光输出光束和抽运的准直 LD 光束分开。双包层光纤的两个端面均是良好的抛光面,其中一个面作为输出镜,反射率约为 3.5%。

采用上述实验装置,在仅有尾纤 LD 抽运源工作时,驱动电流达 10 A 时观察到光纤激光器有激光输出,当其最大驱动电流达到 50 A 时,得到 9.23 W 的准直激光输出;在仅有准直 LD 抽运源工作时,驱动电流达 7.5 A 时观察到有激光输出,当其最大驱动电流达到 49 A 时,得到 20.0 W 的激光输出。两 LD 抽运源同时在最大驱动电流下工作时,得到准直后稳定的最大激光输出为 30.6 W,双端抽运光纤激光器总光-光转换效率约 49%。采用 Agilent86142B 光谱分析仪测得光纤激光输出中心波长在 1110 nm,光谱带宽为 8 nm。采用 Spiricon LBA-500pc 横模分析仪测得光纤激光输出的发散角为 0.48 mrad,光束参数为 3.6 mm·mrad。

清华大学精密仪器系光子与电子技术
研究中心,北京 100084
闫平,欧攀,韦文楼,
巩马理*,肖力敏
收稿日期:2003-07-08

* 通信作者, E-mail: gongml@mail. tsinghua. edu. cn