

运用波长与光纤长度关系选择激光波长

陈 柏 陈兰荣 林尊琪 陈绍和

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

明 海 许立新 谢建平

尹红兵 刘有信

(中国科学技术大学 合肥 230026)

(武汉邮电科学研究院 武汉 430074)

提要 推导了掺 Yb 光纤激光器中激射波长与掺杂光纤长度、掺杂浓度等的关系式。依据所得到的关系式,在 981.5 nm 半导体激光抽运的掺 Yb 环形腔石英光纤激光器中,获得了中心波长在 1053 nm 的激光输出。光抽运阈值功率为 1.85 mW。激光半功率宽度(FWHM)为 5 nm,输出功率为 104 μ W。斜率效率为 3%。激光空间模式为基横模。

关键词 光纤激光器, Yb 掺杂, LD 抽运, 环形腔

1 引 言

当前,惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器前端系统中使用 1053 nm 激光波长,经过后续多级能量放大及三倍频对靶丸加热实现聚变反应。系统要求前端激光振荡器有毫瓦量级功率输出。由掺 Yb 石英玻璃中 Yb³⁺ 的光谱图可知^[1], Yb³⁺ 在 970~ 1200 nm 范围内有连续的荧光发射,1053 nm 位于发射谱中。但其发射截面相对较小,不易实现激光输出。对于掺 Yb 光纤激光器,有不少人观察到激光运转波长与光纤长度有关^[2~ 5]。目前未见有对运转波长与光纤长度之间给出直接对应关系的报道。本文用解析方法研究并推得了激光运转波长与掺杂浓度、光纤长度等的对应关系,并依据所得到的关系式设计光纤激光器,获得了 1053 nm 的激光输出。

2 理论分析

在光纤环形腔中,信号光环行一周前后有如下关系

$$I = I_0 K(\lambda) \exp \left[\int_0^L g(z, \lambda) dz \right] \quad (1)$$

其中, $K(\lambda)$ 为波分复用器(WDM)强度耦合系数, $g(z, \lambda)$ 为光纤长度 z 处的增益系数。令

$$\delta(\lambda) = - \ln K(\lambda) \quad (2)$$

则(1)式变为

$$I = I_0 \exp \left[\int_0^L g(z, \lambda) dz - \delta(\lambda) \right] \quad (3)$$

令

$$G(\lambda, l) = \int_0^l g(z, \lambda) dz \quad (4)$$

$G(\lambda, l)$ 为信号光在光纤中运行长度为 l 时获得的总增益。设环行一周光纤长度为 L 。激光阈值条件为

$$G(\lambda, L) = \delta(\lambda) \quad (5)$$

在掺 Yb 光纤激光器中, 与荧光发射及吸收有关的 Yb³⁺ 能级为 $^2F_{5/2}$ 和 $^2F_{7/2}$ 两能级。其中后者为基态能级。此二能级在基质势场作用下分裂而成两组能级。由此而产生的荧光发射和吸收谱为二宽带谱^[1]。对于宽带发射和吸收, 其微分截面间有如下关系^[6,7]

$$\sigma_e(\lambda) = \frac{Z_l}{Z_u} \sigma_a(\lambda) \exp\left[\frac{E_{zl} - hc\lambda^{-1}}{KT}\right] \quad (6)$$

其中, Z_l, Z_u 为配分函数。 E_{zl} 为激光上下能级因斯塔克分裂而成的两组能级中最低能级之差。 K 为波耳兹曼常数, T 为温度。

在(6)式中, 对波长 λ 的发射和吸收分别考虑了上、下两组能级中各子能级的集体作用。为此, 依据(6)式考虑波长 λ 的发射和吸收时, 把上、下两组能级简化为上下两能级处理。在此基础上, 再考虑掺 Yb 激光器的增益特性。

激光下能级为基态 $^2F_{7/2}$, 设其粒子数密度为 N_1 ; 上能级为 $^2F_{5/2}$, 其粒子数密度为 N_2 。设掺杂浓度为 N , 则有

$$N = N_1 + N_2 \quad (7)$$

于是增益可表示为

$$G(\lambda, l) = \int_0^l g(z, \lambda) dz = \int_0^l [N_2(z) \sigma_{el}(\lambda) - N_1(z) \sigma_{al}(\lambda)] dz \quad (8)$$

粒子数速率方程为

$$\frac{dN_2(z)}{dt} = R(z) - \frac{I_L(z)g(z, \lambda)}{h\nu_L} - \frac{N_2(z)}{\tau} \quad (9)$$

其中, R 为抽运速率。设光纤中 z 处单位体积内抽运光子数为 $\Phi(z)$, 抽运光强为 $I_p(z)$ 。则有

$$R(z) = - \frac{d\Phi(z)}{dz} = - \frac{dI_p(z)}{dz} \frac{1}{hc\nu_p} = - \frac{dI_p(z)}{dz} \frac{1}{h\nu_p} \quad (10)$$

由于在 Yb³⁺ 光谱的大部分区间, 吸收与发射同时存在。考虑一般情形

$$dI_p(z) = - I_p(z) \sigma_{ap} N_1(z) dz + I_p(z) N_2(z) \sigma_{ep}(z) dz \quad (11)$$

考虑小信号情形, 此时粒子数速率方程简化为

$$\frac{dN_2(z)}{dt} = R(z) - \frac{N_2(z)}{\tau} \quad (12)$$

τ 为受激粒子在上能级的寿命, 在稳态条件下, (12) 式左边为零, 由此得到

$$R(z) = \frac{N_2(z)}{\tau} \quad (13)$$

设 $I_p(0)$ 为抽运入光纤中的光强, $I_p(l)$ 为光纤输出端剩余的抽运光强。当对抽运光的吸收达到 10 dB 时, 可认为

$$I_p(0) \gg I_p(l) \quad (14)$$

对(14)式作一评估。掺杂浓度为 580×10^{-6} 时^[4], 915 nm 吸收为 45 dBm^{-1} , 974 nm 吸收为 70 dBm^{-1} , 840 nm 吸收为 2 dBm^{-1} 。因此, 对 915 nm 抽运光, 0.3 m 便满足(14)式; 而 974 nm, 840 nm 分别为 0.2 m 和 5 m。在实际使用中, (14)式一般是被满足的。

$$I_c = \frac{h\nu_p}{(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\tau} \quad (15)$$

当 $\sigma_{ep} = 0$ 时, I_c 便等于饱和光强^[8]。

利用以上各式, 在(14) 式近似条件下可解得

$$I_p(l) = I_p(0) \exp\left[\frac{I_p(0)}{I_c} - N\sigma_{ap}L\right] \quad (16)$$

于是可求得信号光通过长度 L 光纤的总增益为

$$G(\lambda, L) = \frac{\tau\sigma_{al}I_p(0)}{h\nu_p} \left[1 + \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left[\frac{E_{zl} - hc\lambda^{-1}}{KT}\right] \right] \left[1 - \exp\left[\frac{I_p(0)}{I_c} - N\sigma_{ap}L\right] \right] - N\sigma_{al}L \quad (17)$$

对给定的激光波长 λ , 因光纤长度 L 的变化而使其获得最大增益的条件为

$$\frac{\partial G(\lambda, L)}{\partial L} = 0 \quad (18)$$

由此可得

$$1 + \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left[\frac{E_{zl} - hc\lambda^{-1}}{KT}\right] = \exp\left[LN\sigma_{ap} - \ln\left[\beta_{\min} \frac{I_p(0)}{I_c}\right] - \frac{I_p(0)}{I_c}\right] \quad (19)$$

其中

$$\beta_{\min} = \frac{\sigma_{ap}}{(\sigma_{ep} + \sigma_{ap})} \quad (20)$$

β_{\min} 表示, 若要使抽运光透明, 所需上能级粒子数与总粒子数的最小百分比^[8]。

由(19) 式可看出, 在掺 Yb 光纤激光器中, 对于确定的抽运波长, 掺杂浓度 N 或光纤长度 L 的增大将使更长波长的激光获得最大增益。因此在损耗与波长无关时, 在一定的掺杂浓度下, L 的增大将使得更长波长的激光运转。这一点与已有的报道^[2, 3, 5] 及实验观察一致。在实验中当激光出现后, 运转波长不会因入纤光强而发生变化。但从(19) 式看, 入纤功率增大, 运转波长将向短波移动, 这是由(12) 式小信号近似所致。(19) 式中入纤光强应为阈值时入纤光强。因为具有最低阈值的波长起振后, 对于大信号, 由于均匀加宽中的增益饱和效应, 其他波长被抑制。激光运转波长不会随入纤功率增大而变化。WDM 耦合系数频率响应特性对运转波长的影响体现在阈值中。(19) 式中与 I_c 对应的功率在本实验中约为 8 mW。由(19) 可看出, 对于 I_c 较大的抽运波长, 且损耗随波长的变化较为平缓时, 影响运转波长的主要因素为长度和浓度。

利用(19) 式对已报道的实验结果^[4] 进行计算。理论与实验结果符合得较好。实验中用 0.5 m 掺 Yb 光纤获得波长 974 nm 激光, 而 1 m 则得到 1036 nm 激光。理论计算值为, 974 nm 对应长度 0.45 m, 而 1036 nm 约对应 0.8 m。各参数为 $\alpha_p = N\sigma_{ap} = 41/4.34 = 9.4 \text{ m}^{-1}$, $\lambda_p = 900 \text{ nm}$, $\sigma_{ep} = 0$, 抽运饱和功率 5 mW, 974 nm 激光对应阈值 11.5 mW, 1036 nm 对应 9.4 mW, $E_{zl} = 10300 \text{ cm}^{-1}$, $KT = 205 \text{ cm}^{-1}$, $Z_l/Z_u \approx 1$ ^[6]。在 1036 nm 时, 实验值超出理论值较多。这是由于理论中没有考虑抽运光与激光在光纤中的模场耦合所致。由于耦合失配, 故实验值大于理论值。

为减少理论计算值与真实值的误差, 可采用以下比较方法求 λ 与 l 的关系。分别用两组 λ, l 值代入(19) 式, 且考虑到 $\alpha_p = N\sigma_{ap}$ 后得到

$$\exp[\alpha_p(l_2 - l_1)] = \frac{1 + \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left[\frac{(E_{zl} - hc\lambda_2^{-1})}{KT}\right]}{1 + \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left[\frac{(E_{zl} - hc\lambda_1^{-1})}{KT}\right]} \cdot \exp\left[\ln\left[\frac{P_2}{P_1}\right] + \frac{1}{P_c}(P_2 - P_1)\right] \quad (21)$$

其中, P_1, P_2 分别为两波长所对应的阈值功率, P_c 为与 I_c 对应的功率。若对满足式(14) 的某一光纤长度 l_1 , 通过实验得相应激射波长 λ_1 , 阈值 P_1 。则对其他波长, 在求得 P_2 后由式(21) 可求其获得最大增益所对应的光纤长度。在某些情况下可预估 P_2 。而一般情形利用式(5) 和式(17) 等可得在 $\delta(\lambda)$ 确定条件下, 波长 λ 与最低入纤抽运阈值间的关系式, 由此可求 P_2 。

3 实验与结果

实验装置示意图见文献[9]。把掺 Yb 光纤分别与 WDM 的端口 2 及 3 相联接, 则构成一环形腔。其中 ABCD 为掺 Yb 光纤。WDM 的端口 4 作为激光输出口, 端口 1 用来输入抽运光。抽运光经非球面透镜(焦距约 3 mm) 准直后, 再经显微物镜(10×) 聚焦耦合入 WDM 端口 1

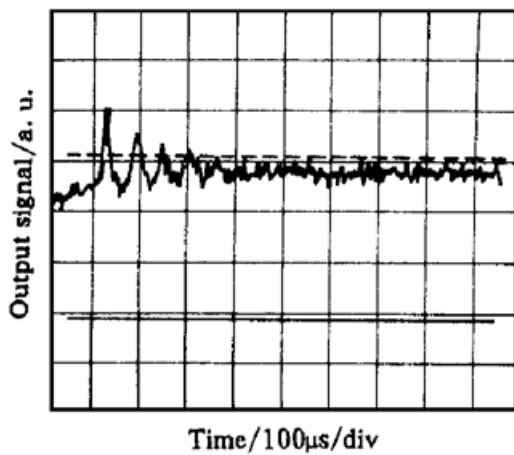


图1 掺 Yb 环形腔光纤激光器弛豫振荡波形

Fig. 1 Relaxation oscillation waveform record of the Yb-doped ring fiber laser

的光纤。所采用掺 Yb 光纤, 其芯径为 6.34 μm , 截止波长约为 860 nm。掺杂浓度以吸收系数反映, 对 981.5 nm 抽运光的吸收约为 3 dBm^{-1} 。抽运源为单模半导体激光器(LD), 其中心波长为 981.5 nm。把抽运光调制成脉宽约 3 ms 的方波后, 用 PIN 管接收光纤输出激光, 随后用示波器观察弛豫振荡。并利用光栅单色仪、光电倍增管及 $x-y$ 记录仪, 记录掺 Yb 环形光纤激光器输出的激光光谱。首先采用 7.6 m 掺 Yb 光纤, 得到 1041 nm 激光输出, 光抽运阈值功率 1.4 mW。WDM 对 1041 nm 及 1053 nm 激光的耦合系数分别为 0.95, 0.98, 再与 Yb^{3+} 光谱图一起可预估两者有相近的阈值。因此在(21) 式中, 把等式右边第二项近似视为 1, 然后由(21) 式计算得 1053 nm 所需光纤长度约为 8.5 m, 实验中当采用 9.2 m 掺 Yb 光纤时获得 1053 nm 激光输出。激光半功率宽度约 5 nm。抽运吸收阈值 1.85 mW, 斜率效率约 3%。当抽运吸收功率 6.66 mW 时, 得到 104 μW 激光输出。激光空间模式为基横模。弛豫振荡波形、激光运转情况及光谱特性分别见图 1~ 3。

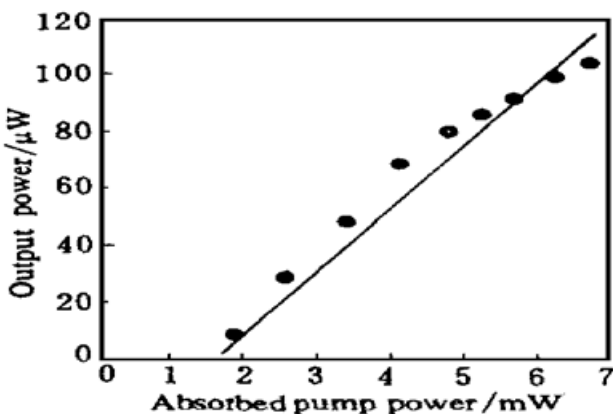


图2 掺 Yb 环形腔光纤激光器输出特性图

Fig. 2 Output power against absorbed pump power for the Yb-doped ring fiber

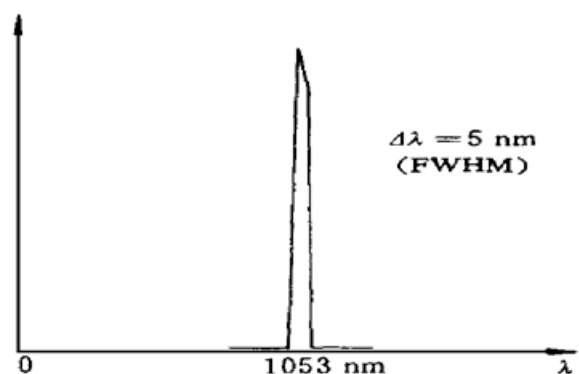


图3 掺 Yb 环形腔光纤激光器激光光谱

Fig. 3 Laser spectrum of the Yb-doped ring fiber laser

依据推得的激射波长与掺杂光纤长度间的关系式, 利用 981.5 nm 半导体激光器抽运掺 Yb 环形腔石英光纤激光器, 获得了中心波长为 1053 nm 的激光输出。当把实验所得阈值和入纤功率代入(21)式中, 可得对应于 1053 nm 的掺杂长度约为 8.93 m。与实验结果符合得很好。WDM 耦合系数频率响应特性对运转波长的影响已体现在阈值中。在本文所作研究的基础上可导出阈值与光纤长度、耦合损耗等的关系式, 能更准确地描述掺 Yb 环形腔光纤激光器的特性, 并更好地指导该类激光器的设计。以上结论也适用于直腔式掺 Yb 光纤激光器。本实验中, 激光运转斜率效率低, 认为是由于 WDM 强度耦合系数太高所致。当吸收功率为 6.66 mW 时(略小于最大入纤功率), 得到 104 μ W 的激光输出。今后我们将采用带尾纤的 LD 作为抽运源, 能使入纤功率达到约 100 mW。同时, 改变 WDM 对激光的耦合系数, 使其满足最佳耦合输出条件。将能获得 10 mW 以上的激光输出。

参 考 文 献

- 1 Rudiger Paschotta, Johan Nilsson, Anne C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7): 1049
- 2 J. Y. Allain, M. Monerie, H. Poignant. Ytterbium-doped fluoride fibre laser operating at 1.02 μ m. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(11): 988~ 989
- 3 J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie *et al.*. Highly efficient 980 nm operation of an Yb³⁺-doped silica fibre laser. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(5): 298~ 299
- 4 D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry *et al.*. An ytterbium-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from 1.010 μ m to 1.162 μ m and three-level operation at 974 nm. *J. Mod. Optics*, 1990, **37**(4): 517~ 526
- 5 D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry *et al.*. Continuous-wave oscillation of a monomode ytterbium-doped fibre laser. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(17): 1111~ 1113
- 6 Stephen A. Payne, L. L. Chase, Larry K. Smith *et al.*. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er³⁺, Tm³⁺, and Ho³⁺. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(11): 2619~ 2360
- 7 D. E. McCumber. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra. *Phys. Rev.*, 1964, **136**(4A): A954~ A957
- 8 Xuelu Zou, Hisayoshi Toratani. Evaluation of spectroscopic properties of Yb³⁺-doped glasses. *Phys. Rev. B*, 1995, **52**(22): 889~ 896
- 9 Chen Bai, Chen Lanrong, Lin Zunqi *et al.*. A LD pumped Yb³⁺-doped ring fiber laser operating at 1041 nm. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(11): 965~ 968 (in Chinese)

Selecting Lasing Wavelength by Varying Fiber Length

Chen Bai Chen Lanrong Lin Zunqi Chen Shaohe

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Ming Hai Xu Lixin Xie Jianping

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Yin Hongbin Liu Youxing

(Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunication, Wuhan 430074)

Abstract Relationship among lasing wavelength, fiber length and dopant concentration has been deduced in Yb³⁺-doped fiber laser. Based on the relationship, a single spatial mode ring fiber laser operating at 1053 nm pumped by a 981.5 nm, laser diode has been achieved with a linewidth of 5 nm, pumping threshold 1.85 mW and slope efficiency 3%.

Key words doped fiber laser, Yb-doping, LD pump, ring cavity