

文章编号: 0253-1239(2001)02-164-03

掺 Yb 光纤激光器抽运阈值研究*

陈 柏 林 尊 琪

高功率激光物理国家实验室, 上海 201800
中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要: 根据粒子数速率方程、石英中 Yb³⁺ 的能级和光谱特性及 MucCumber 关系式推导了描述掺 Yb 光纤激光器抽运阈值的表达式。对影响抽运阈值的各因素进行了分析, 并进行了相应的实验研究。理论值与实验结果符合。

关键词: 光纤激光器; Yb 掺杂; 阈值抽运功率

中图分类号: O432.1⁺2 文献标识码: A

1 引 言

由于掺 Yb 光纤具有宽的吸收和发射带, 掺 Yb 光纤激光器激起了人们的研究热情^[1~3]。描述掺 Yb 光纤激光器抽运吸收阈值的表达式已有报道^[4]。但在该报道中, 描述抽运吸收阈值的表达式未考虑腔镜反射率的影响, 且其受激上能级粒子数采用的是沿光纤轴线的平均值, 未反映抽运功率及受激上能级粒子数沿光纤轴线的演化情况, 因而没能描述入纤抽运阈值的变化规律。本文从粒子数速率方程出发, 考虑了腔镜等因素的影响以及抽运功率和受激上能级粒子数沿光纤轴线的演化情况, 得出了能更全面、更细致地描述抽运吸收阈值的表达式。已报道的实验结果及我们的实验观测值都与理论值符合。也得到了描述入纤抽运阈值的关系式。并推断出, 为降低入纤抽运阈值, 光纤长度有一最佳值。

2 理论分析

光纤激光器中, 设 $g(z, \lambda)$ 为位于光纤 z 处的增益系数, 光纤总长度为 l , 则信号光单程增益为

$$G(\lambda, l) = \int_0^l g(z, \lambda) dz, \quad (1)$$

激光阈值条件为

$$G(\lambda, l) = \delta(l), \quad (2)$$

对于直腔, 若忽略光纤与腔镜的耦合损耗

$$\delta(\lambda) = -(\ln r_1 r_2)/2, \quad (3)$$

r_1, r_2 为前后腔镜的反射率。在掺 Yb 光纤激光器中, 与荧光发射和吸收有关的 Yb³⁺ 能级为 $^2F_{5/2}$ 和

$^2F_{7/2}$ 两能级。后者为基态能级。此二能级在基质势场作用下分裂成两组能级, 由此而产生的荧光发射和吸收谱为二连续的宽带曲线^[7]。对于宽带发射和吸收, 其微分截面间有如下关系^[5, 6]

$$\sigma_e(\lambda) = \frac{Z_1}{Z_u} \sigma_a(\lambda) \exp\left[\frac{E_{ZL} - hc\lambda^{-1}}{kT}\right], \quad (4)$$

Z_u, Z_1 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。在掺 Yb 石英中^[3], E_{ZL} 对应 10300 cm^{-1} 。 k 为玻耳兹曼常数, T 为温度。常温下^[9], kT 对应 205 cm^{-1} 。设 $I_p(0)$ 为进入光纤中的光强, $I_p(l)$ 为光纤输出端剩余的抽运光强。对抽运光的吸收达到 10 dB 时, 可认为

$$I_p(0) \gg I_p(l) \quad (5)$$

利用粒子数速率方程, 在阈值附近、稳态条件下并考虑到(4)式及(5)式可求得信号光通过长度为 l 的光纤后总增益为^[10]

$$G(\lambda, l) = \frac{\tau\sigma_{al}I_p(0)}{h\nu_p} \left[1 + \frac{Z_1}{Z_u} \exp\left[\frac{E_{ZL} - hc\lambda^{-1}}{kT}\right] \right] \times \left[1 - \exp\left[\frac{I_p(0)}{I_c} - N\sigma_{ap}l\right] \right] - N\sigma_{al}l, \quad (6)$$

其中, N 为掺杂浓度, I_c 由下式确定:

$$I_c = h\nu_p / [\sigma_{ap} + \sigma_{ep}] \tau. \quad (7)$$

σ_{ep} 和 σ_{ap} 为抽运波长处的微分发射和吸收截面, σ_{al} 为信号波长处的微分吸收截面。由(2)、(6)式可得:

$$\frac{\tau\sigma_{al}I_p(0)}{h\nu_p} \left[1 + \frac{Z_1}{Z_u} \exp\left[\frac{E_{ZL} - hc\lambda^{-1}}{kT}\right] \right] \times \left[1 - \exp\left[\frac{I_p(0)}{I_c} - N\sigma_{ap}l\right] \right] - N\sigma_{al}l = \delta(\lambda). \quad (8)$$

上式为入纤抽运阈值光强所满足的关系式, 由此可得入纤抽运阈值功率所满足的关系式

* 国家科委 863-高科技项目。

收稿日期: 1999-02-05; 收到修改稿日期: 2000-04-08

$$\frac{\tau_{\text{al}} p^{\text{th}}(0)}{h\nu_p A} \left[1 + \frac{Z_l}{Z_u} \exp\left[\frac{E_{ZL} - hc\lambda^{-1}}{kT}\right] \right] \times \left[1 - \exp\left[\frac{p^{\text{th}}(0)}{I_c A} - N\sigma_{\text{ap}} l\right] \right] - N\sigma_{\text{al}} l = \delta(\lambda), \quad (9)$$

式中 A 为纤芯截面积。考虑到吸收光强满足^[10]

$$I_a = I_p(0) - I_p(l) = I_p(0) \left[1 - \exp\left[I_p(0)/I_c - N\sigma_{\text{ap}} l \right] \right], \quad (10)$$

可求得掺 Yb 光纤激光器的抽运吸收阈值功率为

$$p_a^{\text{th}} = [Ah\nu_p / (\tau_{\text{al}})] [N\sigma_{\text{al}} l + \delta(\lambda)] \times \{1 + (Z_l/Z_u) \exp[(E_{ZL} - hc\lambda^{-1})/(kT)]\}^{-1}, \quad (11)$$

利用(11)式所计算的理论与已报道的实验观测值符合得很好。在文献[3]的实验中,用 900 nm 钛宝石激光抽运 0.5 m 掺 Yb 光纤,获 974 nm 激光,阈值 11.5 mW,光纤芯径 3.7 μm ,对 900 nm 光吸收为 41 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$,对 974 nm 光的吸收为 70 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$,腔镜反射率分别为 99%、3.5%。由(11)式所得理论抽运吸收阈值约 10 mW。其中 $\tau = 0.77 \text{ ms}$ ^[3], $\sigma_{\text{al}} = 1.6 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ^[8], $Z_l/Z_u \approx 1$ ^[9]。在文献[1]的实验中,抽运波长 869 nm,光纤长 7 m,芯径 2.5 μm ,激光波长 1020 nm;前后腔镜均为光纤光栅,反射率分别为 99%、65%,阈值 8 mW; $\sigma_{\text{al}} = 0.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\sigma_{\text{ap}} = 1.3 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\tau = 0.77 \text{ ms}$,掺杂浓度 $8.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。利用以上参数由(11)式得理论抽运吸收阈值为 7.1 mW。

由(11)式可知,对确定的激光波长,在 Yb³⁺ 的吸收带宽内,所允许的抽运波长的变化对抽运吸收阈值影响很小,而由于在包含入纤抽运阈值的(9)式中有抽运吸收截面项,使得抽运波长的改变会对入纤抽运阈值功率产生大的影响。另外,由上述二式可知,抽运吸收阈值功率与掺杂光纤长度是线性关系,而入纤抽运阈值功率与之则是非线性关系。进一步考察入纤抽运阈值功率随掺杂光纤长度的变化特性时,为简单起见,考虑腔镜等损耗较小、阈值较低情形。由(9)式,此时入纤抽运阈值功率可近似为 $p^{\text{th}}(0) = (Ah\nu_p / \tau_{\text{al}}) [N\sigma_{\text{al}} l + \delta(\lambda)] \times \{1 + (Z_l/Z_u) \exp[(E_{ZL} - hc\lambda^{-1})/(kT)]\}^{-1} \times [1 - \exp(-N\sigma_{\text{ap}} l)]$ 。 (12)

例如文献[1]的实验中,阈值功率 $P^{\text{th}}(0) = 8 \text{ mW}$,由(7)式及已知参数得(9)式中 $I_c A = 10.8 \text{ mW}$,而 $N\sigma_{\text{ap}} l \approx 8$,此时(12)式是近似成立的。

3 实验与分析

实验所用光纤由武汉邮电科学研究院研制。光

纤参数:光纤芯径 4.3 μm , Yb³⁺ 浓度以实测吸收系数反映,即对 915 nm 激光吸收为 8.1 $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 。实验所用抽运源为钛宝石激光器,如图 1 所示,在实验

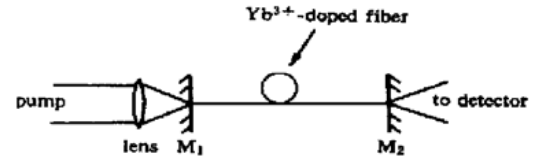


Fig. 1 Experimental setup

中采用法布里-珀罗激光谐振腔。抽运光经显微物镜(10 \times)和前腔镜(对抽运光, $T > 80\%$,对光纤激光, $R > 99\%$)耦合入紧贴前腔镜的光纤的前端。总的抽运耦合效率约 35%。针对掺 Yb 光纤的次吸收峰,用 915 nm 的抽运光进行抽运。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,用示波器观察呈阻尼振荡式的弛豫振荡波形,以确定激光出现时的抽运阈值功率。利用光栅单色仪、光电倍增管及 X-Y 记录仪,记录双包层光纤激光器输出的激光光谱以确定激光波长。实验中采用了长度为 3.5 m 的光纤。

激光输出特性如图 2 所示。当用光纤后端的 3.5% 菲涅耳反射作为后腔镜时,出光阈值为 11 mW(这里出光阈值定义为光纤所吸收的功率,

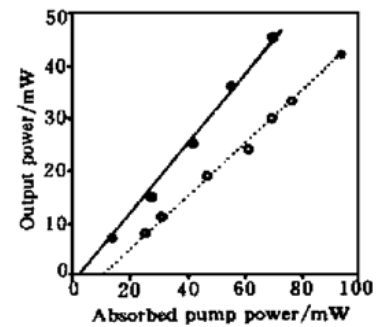


Fig. 2 Output power against absorbed pump power for the Yb-doped fiber laser. O: Fresnel reflection at the rear end of the fiber acting as the rear cavity mirror; ●: with a rear cavity mirror $R = 80\%$

以下同),斜效率为 50%。激光中心波长 1.03 μm ,谱宽(FWHM) 3.5 nm。加上了对激光反射率为 80% 的后腔镜后,抽运阈值降为 3 mW 左右,斜效率达 68%。

用(11)式计算了上述激光器的抽运吸收阈值。当后腔镜反射率为 3.5% 菲涅耳反射时,其理论阈值为 10.35 mW;加反射率 80% 后腔镜时,其理论阈值为 2.57 mW。其中, $\sigma_{\text{al}} = 45 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$ ^[7], $N = 2.54 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\tau = 0.77 \text{ ms}$ ^[3], $Z_l/Z_u \approx 1$ ^[9], E_{ZL} 对应 10300 cm^{-1} ^[3], kT 对应 205 cm^{-1} ^[9]。

4 结论与分析

在掺 Yb 光纤激光器中, 抽运吸收阈值及入纤阈值主要由激射波长、掺杂光纤长度、浓度、纤芯截面积以及腔镜反射率决定。据理论分析, 抽运波长的变化对抽运吸收阈值影响较小, 而对入纤阈值影响较大。当没有选频元件时, 改变掺杂光纤长度将改变激射波长^[10]。当掺 Yb 光纤激光器中有诸如光纤光栅之类选频元件时, 激光器运行波长是确定的。对确定的激光波长, 抽运吸收阈值功率与掺杂光纤长度之间是线性关系, 光纤越长, 所需抽运吸收阈值也越大。由此得出的结论是为降低抽运吸收阈值应采用较短的光纤。但另一方面, 光纤越长则实际吸收、利用抽运功率越多, 抽运入纤阈值功率与掺杂光纤长度之间是非线性关系。由(12)式, 为降低入纤功率阈值, 光纤长度有一最佳值。

图 3 为在抽运波长和激射波长确定的条件下, 依据(11)式及(12)式模拟的抽运吸收阈值功率及抽运入纤阈值功率相对于掺杂光纤长度的变化情况。所采用参数是在实验中后腔镜为 80% 时的参数。其中实线描述入纤阈值功率的变化, 点描述抽运吸

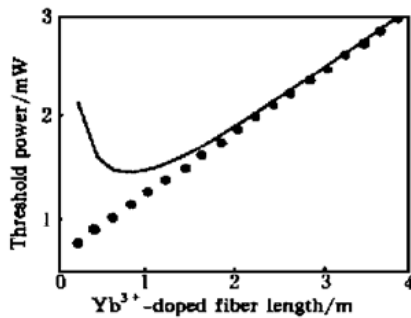


Fig. 3 Relationship between threshold pump power and Yb^{3+} -doped fiber length. Dotted curve: threshold pump power absorbed, solid curve: threshold incident pump power

收阈值功率。由图可知, 在 3.5 m 时, 抽运吸收阈值功率与入纤阈值功率基本相等, 约为 2.7 mW, 而在小于 2 m 后二者差距渐大。入纤阈值功率约在 1 m 处有最小值。

参 考 文 献

- [1] Allain J Y, Bayon J F, Monerie M *et al.*. Ytterbium-doped silica fiber laser with intracore Bragg gratings operating at 1.02 μm . *Electron. Lett.*, 1993, **29**(3): 309 ~ 310
- [2] Armitage J R, Wyatt R, Ainslie B J *et al.*. Highly efficient 980 nm operation of an Yb^{3+} -doped silica fiber laser. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(5): 298~ 299
- [3] Hanna D C, Percival R M, Perry I R *et al.*. An Ytterbium-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from 1.010 μm to 1.162 μm and three-level operation at 974 nm. *J. Modern Optics*, 1990, **37**(4): 517~ 525
- [4] Zhou Xuelu, Toratani H. Evaluation of spectroscopic properties of Yb^{3+} -doped glasses. *Phys. Rev. (B)*, 1995, **52**(22): 889~ 896
- [5] Payne S A, Chase L L, Smith L K *et al.*. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er^{3+} , Tm^{3+} , and Ho^{3+} . *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(11): 2619~ 2630
- [6] McCumber D E. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra. *Phys. Rev. (A)*, 1964, **136**: 954~ 957
- [7] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(7): 1049~ 1056
- [8] Allain J Y, Monerie M, Poignant H. Ytterbium-doped fluoride fiber laser operating at 1.02 μm . *Electron. Lett.*, 1992, **28**(11): 988~ 989
- [9] DeLoach L D, Payne S A, Chase L L *et al.*. Evaluation of absorption and emission properties of Yb^{3+} doped crystals for laser applications. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(4): 1179~ 1190
- [10] 陈 柏, 陈兰荣, 林尊琪 等. 运用波长与光纤长度关系选择激光波长. *中国激光*, 1999, **A26**(12): 1601 ~ 1065

Study on the Threshold in Ytterbium-Doped Fiber

Chen Bai Lin Zunqi

National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai 201800

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

(Received 2 February 1999; revised 8 April 2000)

Abstract: On the basis of the population rate equation, energy levels and spectrum characteristics of Yb^{3+} in host and McCumber relation, the formulas describing pump threshold power are deduced for Yb^{3+} -doped fiber laser. The factors affecting pump threshold power are analysed. Related experiments have been conducted. Theory are in accord with experimental results.

Key words: fiber laser; Yb^{3+} -doping; threshold pump power