

# 钛宝石激光泵浦的掺 Yb 光纤激光器

华仁忠 陈兰荣 逯其荣 陈 柏 刘玉璞 张影华 尹红兵 刘有信  
(中国科学院上海光机所高功率激光联合实验室 上海 201800) (武汉邮电科学研究院 武汉 430074)

**提要** 报道了国产掺 Yb 石英光纤激光器的成功运转。用波长为 915 nm 的钛宝石激光泵浦 3.5 m 长的光纤时,激光中心波长为 1.03  $\mu\text{m}$ ,激光阈值可低至 5 mW,斜效率可达 68%。用 860 nm 泵浦能得到相似的结果。另外,当光纤短于 0.5 m 时能得到 974 nm 激光振荡。

**关键词** 光纤激光,泵浦阈值,Yb 掺杂

## 1 引 言

掺 Yb 玻璃中的激光振荡在 60 年代就已实现<sup>[1,2]</sup>。由于当时掺 Nd 激光介质的迅速发展,掺 Yb 激光介质的某些优良性能被忽略了。随着掺 Nd 光纤激光器的出现,掺 Yb 光纤激光器的优点被重新认识,其中以 Southampton 大学 Hanna 领导的研究小组的工作尤为突出<sup>[3,4]</sup>。现在,在激光二极管(LD)的泵浦下,掺 Yb 光纤激光器在实现高功率和单频输出方面均取得了令人瞩目的进展<sup>[5]</sup>。本文报道了国产掺 Yb 石英光纤激光器的成功运转,泵浦源为钛宝石激光器。

## 2 镱离子在石英中的光谱结构

以掺 Yb 的石英作为激光介质的主要优点有:激光无激发态吸收;泵浦光和振荡光均具有很宽的可调谐范围;可用 LD 泵浦。镱离子在石英中的光谱结构见图 1(a)。原理上,基态能级  $^2F_{7/2}$  有四个 Stark 分量,其中三个,即图 1(a)中的 a, b, c 能级,已被从室温时的发射光谱确定出来。与激光跃迁有关的上能级为  $^2F_{5/2}$ 。Stark 能级 d 和 e 分别对应于 974 nm 和 910 nm 的吸收峰。泵浦到能级 e 上的粒子快速地从无辐射跃迁弛豫到能级 d 上。能级 d 的荧光寿命为 0.77 ms。从此能级到  $^2F_{7/2}$  可发生两种不同类型的激光跃迁:一种是准四能级跃迁,对应于跃迁  $d \rightarrow b$  和  $d \rightarrow c$ , 波长从 1010 nm 到 1162 nm;另一种是三能级跃迁,波长为 974 nm(跃迁  $d \rightarrow a$ )。与上述能级结构对应的吸收光谱和发射光谱见图 1(b)。较为有趣的是,吸收光谱和发射光谱在 974 nm 处的峰是重合的。

## 3 实验与结果

实验所用的光纤是由武汉邮电科学研究院研制的。光纤拉制采用 MCVD 工艺,Yb 离子的

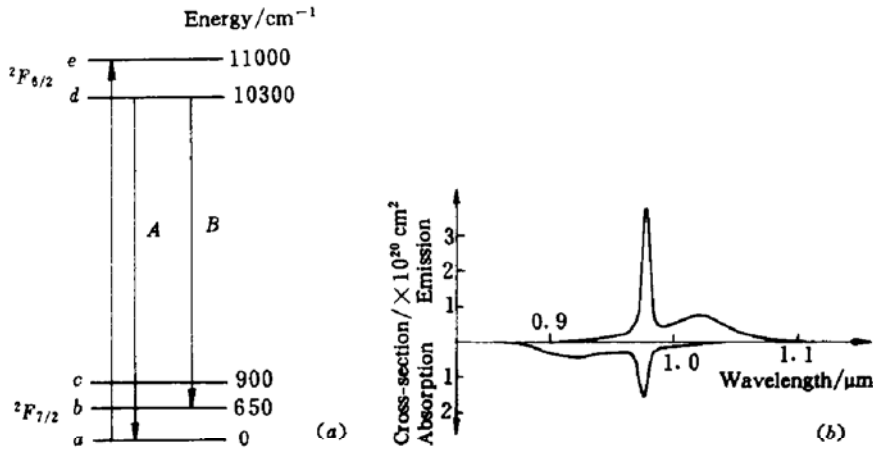


图 1 (a) Yb 离子在石英中的能级结构; (b) 相应的吸收光谱和发射光谱

Fig. 1 (a) Energy level diagram of Yb<sup>3+</sup> in silica; (b) its related absorption and emission spectra

掺入采用了溶液法。光纤参数如下: Yb<sup>3+</sup> 浓度为  $2 \times 10^{-3}$ , 光纤芯径为  $4.3 \mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.23, 截止波长为  $1.13 \mu\text{m}$ 。就  $1.03 \mu\text{m}$  的激光振荡波长而言, 这一截止波长显得长了些, 在我们的实验中, 激光出现了多模振荡。

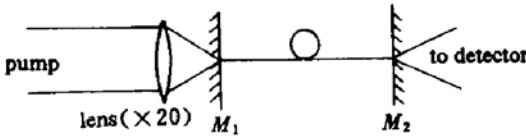


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

实验所用泵浦源为大功率的钛宝石激光器, 波长在  $860 \sim 980 \text{ nm}$  之间可获得大于  $200 \text{ mW}$  的激光输出。在现阶段实验中, 采用了典型的 F-P 激光谐振腔(见图 2)。泵浦光经显微物镜( $20 \times$ )与双色镜(前腔镜——对泵浦光  $T > 80\%$ , 对光纤激光  $R > 99\%$ )耦合入紧贴双色镜的光纤的前端。总的泵浦耦合效率约为  $35\%$ 。在对输出激光功率进行测量时, 每次在功率计探头前放置对泵浦光高反, 对激光

率约为  $35\%$ 。在对输出激光功率进行测量时, 每次在功率计探头前放置对泵浦光高反, 对激光

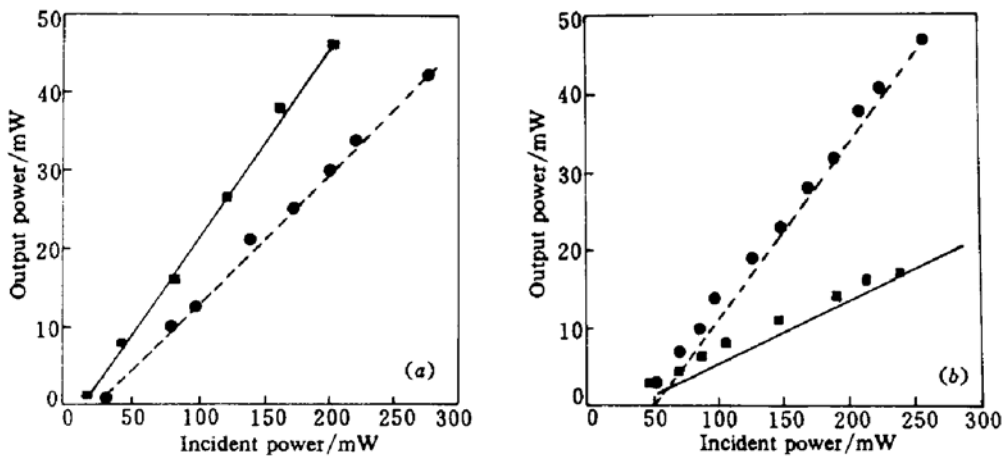


图 3 采用  $915 \text{ nm}$  (a) 和  $860 \text{ nm}$  (b) 泵浦时光纤激光的输出特性, 直线为拟合结果

●: 以光纤后端的菲涅耳反射作为后腔镜; ■: 后腔镜  $R = 20\%$  (a) 和  $95\%$  (b)

Fig. 3 Output of the fiber laser when pumped at  $915 \text{ nm}$  (a) and  $860 \text{ nm}$  (b), straight lines are fitted to the experimental data

●: Fresnel reflection at the rear end of the fiber acts as a rear cavity mirror; ■: with a rear mirror  $R = 20\%$  (a) and  $95\%$  (b)

高透的双色滤光片。针对掺 Yb 光纤的次吸收峰,我们先用 915 nm 的泵浦光进行泵浦。由于我们更感兴趣的是波长大于 1 μm,对应于准四能级跃迁的激光,实验大部分采用了长度为 3.5 m 的光纤。图 3 (a) 为用 915 nm 泵浦时的激光输出特性。对应于图中的虚线及圆点,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吸收功率,以下同),斜效率为 50%。入射到显微物镜前的功率为 276 mW(光纤的吸收功率为 97

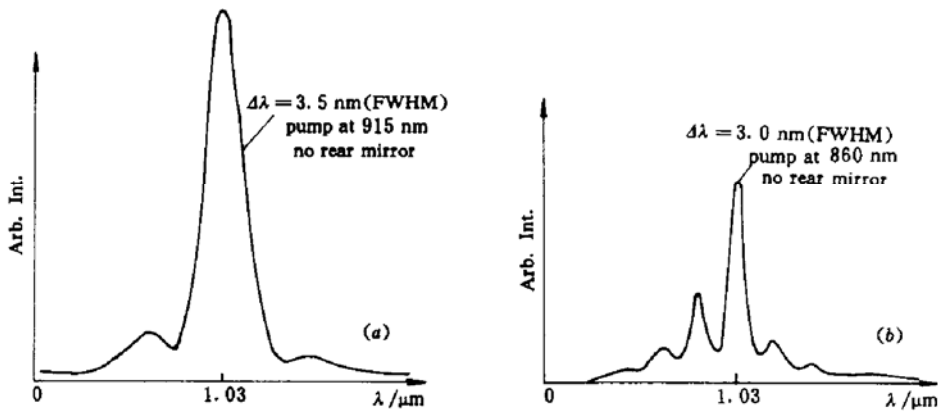


图 4 915 nm (a) 和 860 nm (b) 泵浦时的激光光谱图,后腔镜由光纤后端的菲涅耳反射构成  
 Fig. 4 Output spectrum when pumped at 915 nm (a) and 860 nm (b)  
 Fresnel reflection at the rear end of the fiber acts as a rear cavity mirror

mW)时,得到 40 mW 的激光输出。图 4 (a) 为典型的激光光谱,激光中心波长为 1.03 μm,谱宽 (FWHM)为 3.5 nm。实验中还发现,激光光谱的形状同泵浦的超阈度及激光腔的耦合情况有关。当泵浦功率在阈值附近时,光谱中央峰边上的小峰消失,超阈度增加时,将会在两翼生出更多的小峰,光谱铺开的宽度也增大;加上镀介质膜 (R = 80%) 的后腔镜后,光谱形状变得较为简单,基本上只保留了中央小峰,而中心波长和谱宽基本不变。图 3 (a) 中的实线和方块是加上了对 1.03 μm 反射率为 80% 的后腔镜后的输出特性,泵浦阈值降为 3 mW 左右,斜效率可达 68%。光纤吸收 77 mW 泵浦光

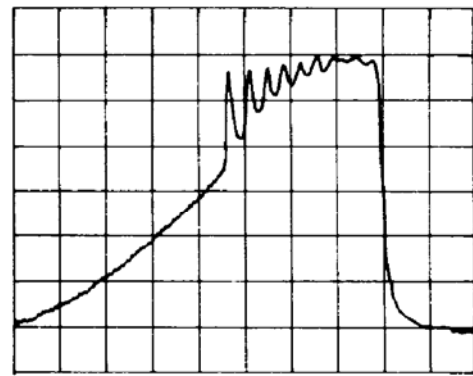


图 5 915 nm 泵浦时光纤激光的示波器波型图  
 Fig. 5 Oscilloscope trace of the fiber laser when pumped at 915 nm (25 μs/div)

时,1.03 μm 激光输出已达 50 mW。为了观察激光的时间特性,将泵浦光调制成脉宽约为 3 ms 的方波后,用 PIN 管接收并用存储示波器观察光纤激光波形。图 5 是不加后腔镜时的激光弛豫振荡波形。从图可看到,弛豫振荡类似有阻尼的正弦波,周期约为 10 μs。当后腔镜为 R = 80% 的反射镜时,弛豫振荡的周期约为 7 μs,振荡序列可持续至 1.7 ms。

因为可靠实用的光纤激光器一般都采用带尾纤的 LD 作为泵浦源,我们以后也准备采用 LD 泵浦。考虑到现有单管 LD 的输出波长和单管功率水平,结合掺 Yb 光纤的吸收特性,我们还用 860 nm 和 980 nm 的泵浦光进行了实验。图 3 (b) 和图 4 (b) 分别为 860 nm 泵浦、菲涅耳反射充当后腔镜时的激光输出特性和光谱特性。860 nm 泵浦时的情况同 915 nm 泵浦基本相

同。无后腔镜时, 阈值功率为 17 mW, 斜效率为 64%, 激光中心波长为 1.036  $\mu\text{m}$ , 谱宽 (FWHM) 为 3 nm。入射到显微物镜前的功率为 260 mW (光纤的吸收功率为 91 mW) 时, 可得到 47 mW 的激光输出; 加上对 1.03  $\mu\text{m}$  反射率为 95% 的后腔镜后, 阈值降低为 10 mW, 斜效率降为 23%。此时斜效率较低的原因是后腔镜透过率太低造成的。860 nm 泵浦时, 激光弛豫振荡波形不够清晰, 靠观察激光光谱的变化来确定出光阈值。在以上实验中, 输出激光的激光空间模式以  $\text{LP}_{11}$  模为主, 有时能得到  $\text{LP}_{01}$  模。

实验中, 我们还用对应于掺 Yb 光纤强吸收峰的 980 nm 泵浦光泵浦了该光纤, 但没有得到 1.03  $\mu\text{m}$  的激光。这一结果可能是因为该光纤太短, 980 nm 泵浦光及荧光使光纤漂白, 大于 1000 nm 激光被压制。

根据掺 Yb 石英光纤的光谱特性, 三能级跃迁的发射截面是四能级跃迁的四倍左右, 当实验所用光纤较短而泵浦足够强时, 974 nm 波长处的吸收会达到饱和并能获得激光输出, 同时四能级系统的激光跃迁被抑制。实验也表明, 用 860 nm 或 915 nm 泵浦时, 只要选用短光纤 ( $L < 0.5 \text{ m}$ ), 即可方便地得到 975 nm 左右的激光振荡。这种激光特性也是掺 Yb 光纤激光所特有的。

**致谢** 感谢林尊琪、陈绍和两位研究员给予的指导。

### 参 考 文 献

- 1 H. W. Etzel, H. W. Gandy, R. J. Ginther. Stimulated emission of infrared radiation from ytterbium activated silicate glass. *Appl. Opt.*, 1962, 1(4):534~536
- 2 E. Snitzer. 8B9-laser emission at 1.06  $\mu\text{m}$  from  $\text{Nd}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  glass. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1966, QE-2(9): 562~566
- 3 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
- 4 D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry *et al.*. An ytterbium-doped monomode fibre laser; broadly tunable operation from 1.010  $\mu\text{m}$  to 1.162  $\mu\text{m}$  and tree-level operation at 974 nm. *J. Mod. Opt.*, 1990, 37(4):517~525
- 5 R. DeMeis. Tunable grating stabilize fiber ring laser. *Laser Focus World*, 1996, 32(12):27~29

## Operation of a Ytterbium-doped Fiber Laser Pumped by Ti:sapphire Laser

Hua Renzhong Chen Lanrong Lu Qirong Chen Bai Liu Yupu Zhang Yinghua

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Yin Hongbin Liu Youxing

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

**Abstract** The operation of a home-made ytterbium-doped fiber laser is reported. When a 3.5 m ytterbium-doped fiber is pumped with a Ti:sapphire laser at 915 nm, lasing at a wavelength of 1.03  $\mu\text{m}$  occurs. The laser operates at a threshold as low as 5 mW with a slope efficiency as high as 68%. Similar results can also be obtained when the fiber laser is pumped at 860 nm. In addition, when a Yb-doped fiber shorter than 0.5 m was used, laser action at 974 nm was obtained.

**Key words** fiber laser, pump threshold, Yb-doping