

文章编号 : 0258-7025(2001)02-0116-03

# 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形腔与直腔激光器的比较研究

陈 柏 陈兰荣 范 薇 林尊琪

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 对带尾纤半导体激光器(LD)抽运的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤环形腔与直腔激光器进行了比较研究。改变腔结构,则激光输出波长改变。环形腔激光器具有较低的腔损耗及阈值,而直腔激光器输出激光则有更窄的光谱半功率宽度(FWHM)。

**关键词** Yb<sup>3+</sup> 掺杂, 光纤激光器, 环形腔与直腔, 带尾纤 LD

中图分类号 : TN 248 文献标识码 : A

## Study of Yb<sup>3+</sup>-doped Ring and Line Cavity Fiber Laser

CHEN Bai CHEN Lan-rong FAN Wei LIN Zun-qi

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

**Abstract** In this paper, the Yb<sup>3+</sup>-doped ring cavity fiber laser is compared with the F-P cavity fiber laser which were both pumped by LD with fiber pigtail. It is found that the lasing wavelength will be changed when the structure of cavity is varied. And it is also found that the Yb<sup>3+</sup>-doped ring cavity fiber laser have lower cavity loss and pump threshold, while F-P cavity fiber laser has narrower FWHM.

**Key words** Yb-doping, fiber laser, ring and line cavity, LD with fiber pigtail

### 1 引 言

光纤激光器能方便地延长增益介质的长度以使抽运光被充分吸收,这一特性使光纤激光器能在低抽运功率下运转,再加之紧凑、体积小等特点,吸引了人们对光纤激光器的研究兴趣。采用半导体激光器(LD)抽运,更能体现光纤激光器的小型化特性。但由于 LD 激光具有较大的发散角,使得 LD 激光耦合入单模光纤变得较为困难。早期采用普通的透镜作耦合系统<sup>[1,2]</sup>,这种方法耦合效率低,受环境温度和机械振动等因素影响较大。近来由于带尾纤 LD 的出现,使这一问题得到了很好的解决,并使光纤激光器朝着实用化方向迈出了重要的一步。随着掺钕光纤激光器的发展,由于掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤具有宽吸收谱、宽增益带和宽调谐范围<sup>[3]</sup>,掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器逐渐引起了人们的关注<sup>[4~6]</sup>。本文报道了利用带尾纤 LD 抽运的直腔和环形腔掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器的研究结果。

### 2 理论分析

在如图 1(a)所示的光纤环形腔中,信号光环行一周前后所遭遇的损耗为

$$\delta_l(\lambda) = -\ln K(\lambda) \quad (1)$$

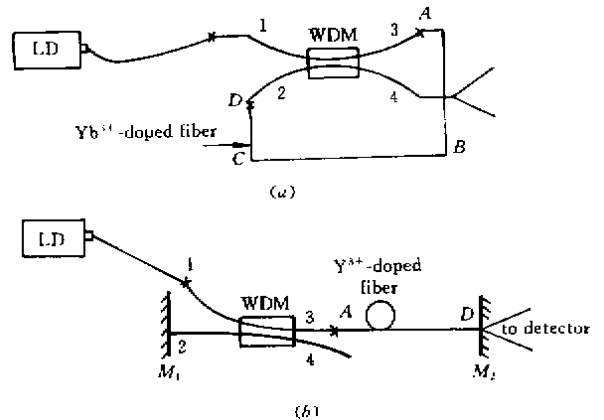


图 1 掺 Yb<sup>3+</sup> 环形腔(a)和直腔式(b)光纤激光器实验装置图

Fig.1 Yb<sup>3+</sup>-doped ring cavity(a) and line cavity(b) fiber laser experiment setup

其中  $K(\lambda)$  为波分复用器(WDM)强度耦合系数。

在如图 1(b) 所示的直腔光纤激光器中, 信号光往返一周前后所遭遇的损耗为

$$\delta_{\text{直}}(\lambda) = -[\ln r_1 r_2 + \ln K^2(\lambda) - \delta_c] \quad (2)$$

其中,  $r_1, r_2$  为前、后腔镜反射率,  $\delta_c$  为光纤与腔镜的耦合损耗。

显然, 有如下关系成立

$$\delta_{\text{直}}(\lambda) > \delta_{\text{环}}(\lambda) \quad (3)$$

即在本实验中, 当把掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器由环形腔结构改为直腔结构时, 直腔结构的损耗大于环形腔结构。

### 3 实 验

实验采用的抽运源为中国科学院半导体所研制的 LD, 该激光器带有一根尾纤作为输出激光之用。抽运光中心波长为 978 nm。掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤长度为 7.6 m, 掺杂浓度为  $2.54 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 光纤芯径约  $6 \mu\text{m}$ , 截止波长约 860 nm。实验中, 利用光栅单色仪、光电倍增管及 X-Y 记录仪记录激光器输出的激光光谱。利用光敏功率计记录输出激光功率, 以观察激光运行情况。

#### 3.1 带尾纤 LD 抽运的掺 $\text{Yb}^{3+}$ 环形腔光纤激光器

如图 1(a) 所示, 把掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤分别与波分复用器(WDM)的端口 2 及 3 相联接, 则构成一环形腔。所采用掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤及 WDM 由武汉邮电科学研究院提供。在环形腔中, ABCD 为掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤。WDM 的端口 4 为激光输出口, 端口 1 用来输入抽运光。WDM 的强度耦合系数在 978 nm 处约为 2%, 而在 1043 nm 处约为 96%。把 LD 尾纤末端与 WDM 的端口 1 相连接便使抽运光输入了环形腔内。掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤长度为 7.6 m。

图 2 为激光器运行图, 由图中点和实线可知, 激光器阈值约为 2 mW, 斜率效率约为 5%。当光纤吸收功率为 14.8 mW 时, 得到 802.22  $\mu\text{W}$  的激光输出。

图 3(a) 为记录的该激光器输出光谱, 激光中心波长为 1043 nm, 半功率宽度(FWHM)为 3.4 nm。输出激光的空间模式为基横模。

#### 3.2 掺 $\text{Yb}^{3+}$ 光纤直腔激光器

如图 1(b) 所示, 把图 1(a) 实验装置中 WDM 端口 2 与掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤在 D 点断开, 并分别在端口 2 及掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤末端 D 放置腔镜  $M_1, M_2$  则构成一直腔。其中  $M_1$  在 970 ~ 1060 nm 区间  $R > 99\%$ ,  $M_2$  在 1020 ~ 1100 nm 区间  $R > 95\%$ 。

由图 2 激光器运行图中方块和虚线可知, 该激光器阈值约为 7.2 mW, 斜率效率约为 4%。当光纤吸收功率为 13.6 mW 时, 得到 284.4  $\mu\text{W}$  的激光输出。

图 3(b) 为记录的该激光器输出光谱, 激光中心波长为 1026.4 nm, FWHM 为 1.93 nm。输出激光的空间模式为基横模。

## 4 结果与讨论

由实验可知, 环形腔比直腔的阈值低, 这可由(3)式予以解释。由(1)式, 环形腔激光器的损耗项主要由强度耦合系数决定。图 1(b) 所示直腔结构中由于采用了 WDM, 使带尾纤 LD 与单模光纤的耦合方便, 但由(2)式知, 也增加了光的损耗, 使阈值升高。由实验可知, 对掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器, 在掺杂光纤长度一定的情况下, 腔结构的改变会使激射波长改变。本实验中, 采用 7.6 m 的掺杂光纤, 当把环形腔改为直腔时, 运行波长由 1043 nm 变为 1027 nm, 同时 FWHM 由 3.4 nm 变为 1.93 nm。我们认为, 以上现象可依据石英中  $\text{Yb}^{3+}$  的能级结构<sup>[6]</sup> 和光谱特性<sup>[7]</sup> 予以解释。在掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器中, 位于 1010 ~ 1162 nm 间的激光运行于准四能级系统<sup>[6]</sup>, 其激光跃迁下能级由于靠基态很近, 在常温下将因玻耳兹曼分布占据有约 4% 的粒子数<sup>[8]</sup>。上述激光将受到这些粒子的共振吸收。由  $\text{Yb}^{3+}$  的光谱图可知, 在上述波长范围内, 越往短波方向, 其发射和吸收都越强。当腔损耗增加时, 所有波长的振荡阈值升高, 因此需更大抽运功率才能有信号光满足阈值条件。而随着抽运功率的增加, 将有更多的粒子被抽运至激光上能级, 这使得基态及激光下能级的粒子数减少, 从而对信号光的吸收减少, 这将使具有较大发射截面的更短的波长更有利于首先达到阈值起振。也就是说随着腔损耗增加, 阈值增大, 而激射波长变短。而对于确定的损耗和阈值, 当激光起振后, 因均匀加宽中的增益饱和效应, 激光波长不会随抽运功率而变化。同时, 腔损耗增加以及均匀加宽中的增益饱和效应也导致了 FWHM 变窄。总之, 在光纤长度一定时, 腔结构的改变导致腔损耗及激光振荡阈值的改变, 这将进一步导致激射中心波长和 FWHM 变化。

由掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤发射谱<sup>[7]</sup> 可知, 如在腔内装置光纤光栅, 则能在 980 ~ 1200 nm 波长区间分别获得由光纤光栅反射中心波长确定的激光输出。但在环

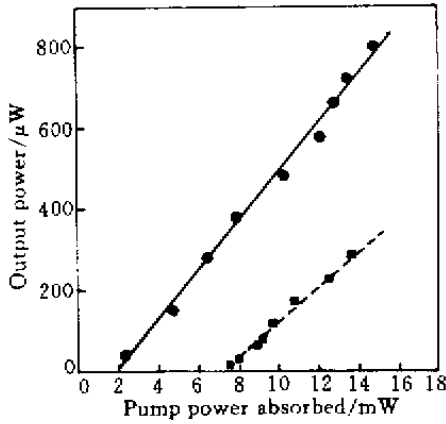


图 2 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器输出特性图

Fig.2 Output power against absorbed pump power for the Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser

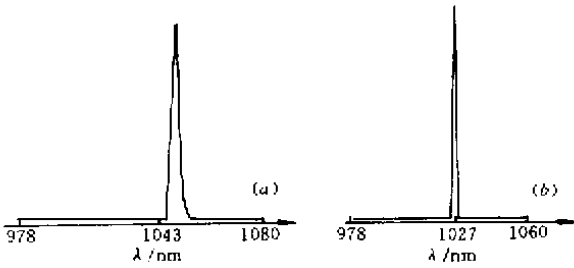


图 3 环形腔 (a) 和直腔式 (b) 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器激光光谱

Fig.3 Lasing spectrum of Yb<sup>3+</sup>-doped ring cavity (a) and line (b) fiber laser

形腔结构中使用光纤光栅,技术相对较复杂且成本昂贵。而对于直腔激光器装置,分别用光纤光栅代替二腔镜,则获得稳固、紧凑、体积小、全光纤整体结构且具有便携式特点的掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤直腔激光器。由于光纤光栅所具有的温度响应特性及掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤的宽荧光发射谱,通过调节温度可实现掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤直腔激光器的波长调谐输出。反之,通过监测激光输出波长的变化则可测定 Yb<sup>3+</sup> 光纤直腔激光器所处环境温度的变化。

### 参 考 文 献

- 1 M. Saruwatari, T. Sugie. Efficient laser-diode-single-mode-fiber coupling using two confocal lenses. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(25) 955 ~ 956
- 2 M. Sumida, K. Takemoto. Lens coupling of laser diodes to single-mode fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **LT-2**: 305 ~ 311
- 3 Xuelu Zou, Hisayoshi Toratani. Evaluation of spectroscopic properties of Yb<sup>3+</sup>-doped glasses. *Phys. Rev. B*, 1995, **52**: 889 ~ 896
- 4 J. Y. Allain, M. Monerie, H. Poignant. Ytterbium-doped fluoride fiber laser operating at 1.02 μm. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(11) 988 ~ 989
- 5 J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie *et al.*. Highly efficient 980 nm operation of an Yb<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(5) 298 ~ 299
- 6 D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry *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
- 7 Rudiger Paschotta, Johan Nilsson, Anne C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7):1049 ~ 1056
- 8 D. C. Hanna, I. R. Perry, R. G. Smart *et al.*. Efficient superfluorescent emission at 974 nm and 1040 nm from an Yb-doped fiber. *Opt. Comm.*, 1989, **72**(3 A) 230 ~ 234