

# 基于光纤 Bragg 光栅的掺铒光纤激光器\*

郭玉彬

(长春邮电学院通信工程系 长春 130012)

菊池和朗

(东京大学先端科学技术研究中心 日本东京 153)

**提要** 研制了基于光纤 Bragg 光栅的掺铒单模光纤激光器。用 980 nm LD 作抽运源,在 1.56  $\mu\text{m}$  波段获得了谱线宽为 0.1 nm 的激光输出。最大输出光功率为 1.73 mW。输出功率稳定性为  $\pm 0.02$  dB,波长稳定性为 0.05 dB。阈值抽运光功率为 7 mW,斜率效率为 3%。

**关键词** 光纤激光器,抽运,光纤 Bragg 光栅

## 1 引 言

早在 70 年代前期,人们就对光纤激光器进行了探索,但真正有实用价值的光纤激光器是在 80 年代中期才出现的。Davidn Payne 领导的研究小组发现掺稀土元素铒对 1.55  $\mu\text{m}$  的光波段有增益作用。近年来,因其自身的波导结构,掺铒光纤具有很高的增益和抽运效率,其增益谱很宽,且能在光通信的第三窗口 1.55  $\mu\text{m}$  波段工作,更加引起人们的关注,被认为是未来长距离、大容量的超高速光纤通信系统的理想光源<sup>[1]</sup>。利用光子集成技术研制应用于密集波分复用(WDM)系统的多波长光纤激光器阵列,便于调谐、封装、温控、使用方便、节省成本,再加上光纤器件具有体积小、重量轻、易于集成的特点,使这种集成化的光纤器件更具吸引力。开展该项研究工作可为一维光子集成激光器的研制奠定基础,将能在新一代 WDM 动态全光通信网络有广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。

人们已提出几种腔结构以实现窄线宽的全光纤激光器。其中包括行波腔结构<sup>[3]</sup>,使用光纤环反射器的结构<sup>[4]</sup>等。行波腔结构掺铒光纤激光器消除了空间烧孔效应,易于实现单纵模激射。但腔长较长,跳模现象很严重。使用光纤环反射器构成谐振腔的掺铒光纤激光器由于缺乏频率鉴别机制而使输出激光线宽较宽,其激射波长也不够稳定。

若将光纤光栅插入掺铒光纤激光器腔,由于光纤光栅的选频作用,激光器的激射波长将被稳定在光纤光栅的 Bragg 波长上。不但激光的激射波长得到了稳定,而且其激射谱线宽和载噪比(激射波长所带的光功率与本底噪声功率之比)也得到了明显的改善。

为此,我们提出并建立了基于光纤光栅的掺铒光纤激光器。整个激光谐振腔结构简单,由一对紫外激光直写的光纤 Bragg 光栅构成。在 1.56  $\mu\text{m}$  波段获得了谱线宽 0.1 nm 的激光输出,并给出了其功率输出特性。

\* 邮电部邮电科技发展基金及教育部国家留学基金资助课题。

收稿日期: 1998-12-28; 收到修改稿日期: 1999-03-02

## 2 掺铒光纤激光器设计原理

### 2.1 抽运特性及阈值特性

掺铒光纤在 0.5~ 1.6  $\mu\text{m}$  波长范围内有几个吸收峰, 分别对应的铒离子能级是 0.5~ 0.6  $\mu\text{m}$  ( $^4I_{15/2} - ^3H_{11/2}$ ), 0.63  $\mu\text{m}$  ( $^4I_{15/2} - ^4F_{9/2}$ ), 0.8  $\mu\text{m}$  ( $^4I_{15/2} - ^4I_{9/2}$ ), 0.98  $\mu\text{m}$  ( $^4I_{15/2} - ^4I_{11/2}$ ) 以及 1.5  $\mu\text{m}$  ( $^4I_{15/2} - ^4I_{13/2}$ ) 直接吸收峰。根据激光原理, 可选择这几个吸收峰的光进行抽运, 其中 0.98  $\mu\text{m}$  和 1.48  $\mu\text{m}$  可采用半导体激光器(LD), 且不存在受激吸收。

本实验选用 980 nm LD 作抽运源, 抽运模型可以看作是准三能级结构。当抽运光增大到一定程度, 以至使能级  $E_2$  上的粒子数  $N_2$  大量积累, 满足粒子数反转条件, 由其粒子数的速率方程可得到<sup>[5,6]</sup>

$$I_p > \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_{21}} \quad (1)$$

其中,  $\sigma_p$  为光纤在抽运光频率  $\nu_p$  的吸收截面;  $I_p$  为抽运光强。  $\tau_{21}$  为两能级间的粒子寿命, 由此得到抽运阈值  $I_{th} > h\nu_p / \sigma_p \tau_{21}$ <sup>[7]</sup>, 当其参数为典型值(即  $\nu_p = 3.0 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ ,  $\sigma_p = 2 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ ,  $\tau_{21} = 14 \text{ ms}$ )时, 可得  $I_{th} \approx 7 \text{ mW}$ 。

### 2.2 抽运源的选择

光纤激光最佳抽运的选择标准是: (1) 抽运效率高; (2) 激发态吸收(ESA)效应要小。通常以  $\sigma_{\text{ESA}} / \sigma_0$  的比值大小来衡量 ESA 的影响程度, 其中  $\sigma_{\text{ESA}}$ ,  $\sigma_0$  分别代表掺杂光纤的激发态吸收截面和基态吸收截面。显然比值  $\sigma_{\text{ESA}} / \sigma_0$  越小越好。最佳抽运波长是 980 nm 和 532 nm。波长为 532 nm 的抽运光源可以选用 YAG 倍频固体激光器。但由于该光源体积庞大, 故只能在实验室使用。波长为 980 nm 的抽运光源可以选用大功率 LD, 由于器件体积小、效率高, 因此是理想的抽运光源。

### 2.3 光纤谐振腔结构设计

全光纤型掺铒光纤激光器谐振腔由一对平行设置的光纤光栅反射镜组成<sup>[8]</sup>。若输入、输出光场分别为  $E_0$  和  $E_i$ , 令两个反射镜的透射率和反射率分别为  $t_1, r_1$  和  $t_2, r_2$ , 掺铒光纤长度及损耗系数分别为  $l$  和  $\alpha$ , 则有

$$E_0 = E_i t_1 t_2 \exp(-\alpha l - ikl) + E_i t_1 t_2 r_1 r_2 \exp(-3\alpha l - 3ikl) + \dots \quad (2)$$

$$E_0 / E_i = [t_1 t_2 \exp(-\alpha l - ikl)] / [1 - r_1 r_2 \exp(-2\alpha l - 2ikl)] \quad (3)$$

其中, 波数  $k = n\omega/c$ 。故得到出射光强与入射光强之比

$$\left| \frac{E_0}{E_i} \right|^2 = \frac{[t_1 t_2 \exp(-\alpha l)]^2}{[1 - 2r_1 r_2 \exp(-2\alpha l)]^2 + 4r_1 r_2 \sin^2(kl)} = \frac{T^2 \exp(-2\alpha l)}{[1 - 2R \exp(-2\alpha l)]^2 + 4R \sin^2(kl)} \quad (4)$$

入射光与输出光之间的相位变化

$$\phi = \tan^{-1} \left[ - \frac{1 + R \exp(-2\alpha l)}{[1 - R \exp(-2\alpha l)] \tan(kl)} \right] \quad (5)$$

其中,  $T = t_1 t_2$ ,  $R = r_1 r_2$ 。

当  $|E_0 / E_i|^2$  取最大值时, 谐振腔形成激光振荡。即

$$\sin(kl) = 0, \quad \text{即 } kl = m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

得到  $l = m(\lambda/2)$  (7)

可见当腔长为激光半波长的整数倍时, 各级反射波与入射波会相干相长出现谐振。该条件与

(5) 式  $\phi = 0, \pi \dots$  的条件一致。

### 3 实验结果

全光纤型掺铒光纤激光器结构如图 1 所示。一对 Bragg 波长相同的光纤光栅熔接在一段掺铒光纤的两端构成激光腔。采用光纤光栅 1(兼作 980 nm 波长的抽运激光输入元件)和窄带光纤光栅反射器 2 作为腔镜,其间接入长度为 10 m 的掺铒光纤以提供光增益。掺铒光纤的掺杂浓度为  $2 \times 10^{-4}$ 。抽运光经过光纤光栅耦合进掺铒光纤,在光纤中形成粒子数反转产生受激发射光,经过窄带光纤光栅得到所需波长的激光输出。

实验中选用 FIBERCORE LIMITED 的 DF1500A 型掺铒光纤。抽运源选用 SDL Optics Inc. 的 SDLO-2400-080 半导体激光器(含光纤光栅稳定化 980 nm 抽运组件),阈值电流为 18 mA,量子效率  $\eta = 0.43 \text{ mW/mA}$ ,抽运功率最大值为 81 mW,抽运源最大驱动电流为 203.8 mA。实验中抽运输出激光功率与抽运源所加驱动电流的关系如图 2 所示。采用 Anritsu ML93B 型功率计,测量范围为 10~ - 40 dBm。

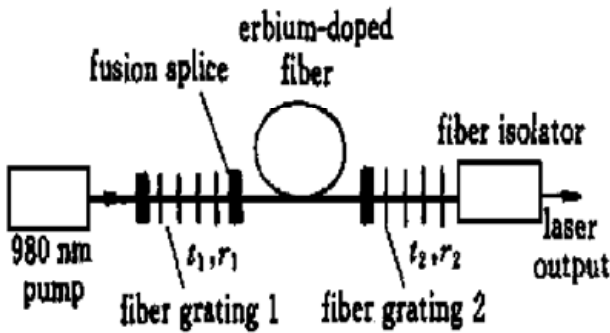


图 1 掺铒光纤激光器结构图

Fig. 1 Schematic configuration of the  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser

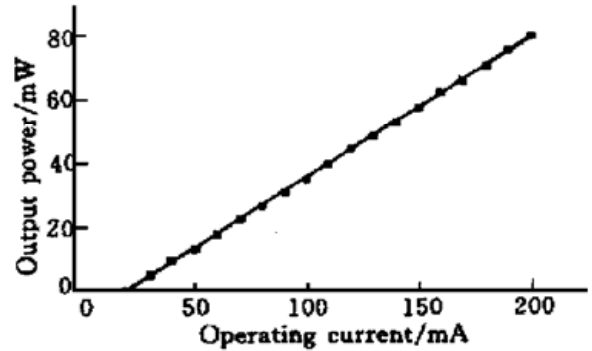


图 2 抽运输出激光功率与抽运源所加驱动电流的关系

Fig. 2 Pumping output power versus current

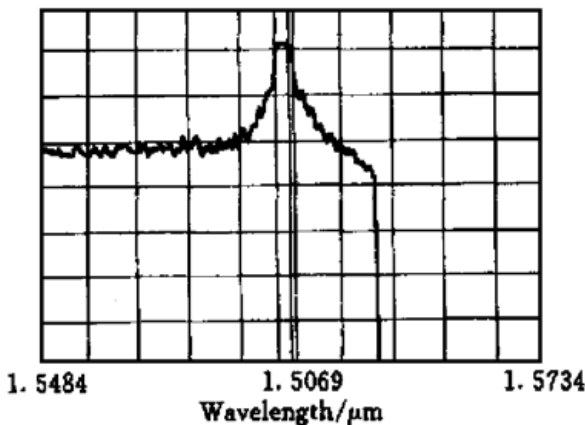


图 3 光纤光栅 1 的反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of fiber Bragg grating 1 used in the experiment

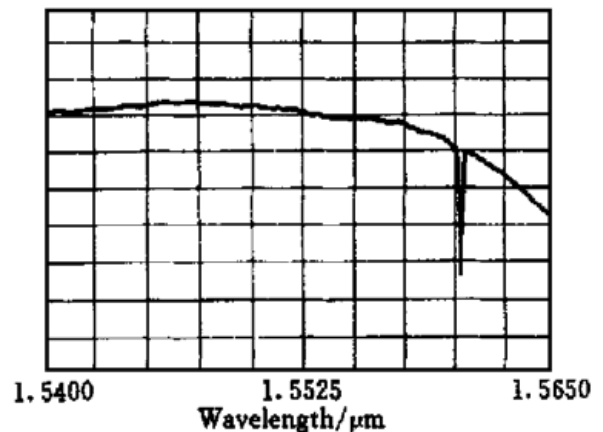


图 4 光纤光栅 2 的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of fiber Bragg grating 2 used in the experiment

光纤 Bragg 光栅采用相位掩模法<sup>[9~ 11]</sup>在氢载的普通光纤上制作而成。选用掺铒光纤放大器(EDFA)在 0 dBm 输入时 ASE 发射谱作为宽带光源。波长范围为 1530~ 1560 nm,饱和输出功率 > 15 dBm,输入光功率为 - 4~ + 7 dBm,光功率输出稳定度 < + 0.1~ - 0.1 dB。噪声系数

$< 6$  ( $P_{in} = 0$  dBm,  $P_{out} = 16$  dBm,  $\lambda = 1550$  nm)。增益平坦度  $\pm 0.5$  dB/nm ( $P_{in} = 0$  dBm)。当抽运功率为 40 mW 时, 输出光功率为 4.95 mW。利用 ASE 较平坦波段 1540~1560 nm 作为发射谱, 并采用光纤光谱分析仪和光纤环行器测试光纤 Bragg 光栅的反射和透射光谱。光谱分析仪工作波长范围为 0.6~1.75  $\mu\text{m}$ , 分辨率为 0.1 nm。实测结果如下:

(1) 光纤光栅 1 作为宽带高反射腔镜, 同时作为抽运光输入端, 在波长为 1560.65 nm 的峰值处反射率大于 99%, 带宽为 0.95 nm。其反射谱如图 3 所示。

(2) 掺铒光纤后接续一窄带光纤光栅 2, 用作掺铒光纤激光器谐振腔的输出选频器, 其透射谱如图 4 所示。光纤 Bragg 光栅峰值透射率为 -5 dB (反射率为 68%), 其中心波长为 1560.35 nm, 3 dB 带宽为 0.13 nm。光纤光栅 2 的输出光谱宽度决定了激光器输出的带宽 (~0.1 nm)。在大于 1560 nm 波段, 光纤 Bragg 光栅透射谱基线呈下降趋势。这主要是由于荧光谱发射强度在大于 1560 nm 波段下降所造成的。

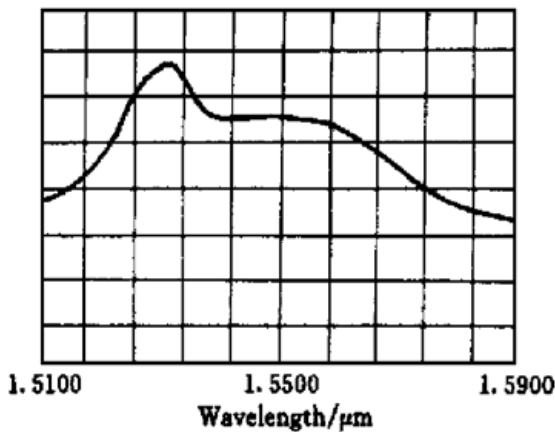


图 5 掺铒光纤增益介质的荧光谱  
Fig. 5 Fluorescence emission spectrum of  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber

构成谐振腔的两个光纤光栅的峰值反射波长要保持严格一致。选用光纤型隔离器加在掺铒光纤激光器后, 防止光纤端面反射对其性能造成影响。其隔离度  $> 50$  dB, 回波损耗  $< -60$  dB, 插入损耗为 0.36 dB, 带宽  $> 60$  nm。

实验中测试了 980 nm LD 抽运下掺铒光纤增益介质的荧光谱, 如图 5 所示。荧光谱峰值为 1.53  $\mu\text{m}$ 。抽运光经一 980 nm/1550 nm WDM 直接激励掺铒光纤, 当 980 nm 抽运光经过光纤吸收后, 抽运出光纤仍有大于 7 mW 的光, 说明光纤中铒离子已经得到粒子反转。如果让受激发射光在光纤中振荡, 就能形成激光。抽运功率不足时, 光纤小于一定长度将观测不到激光输出。

掺铒光纤激光器功率输出特性如图 6 所示。通过调节抽运激光器的功率可以调节输出激光的功率。实验测量范围内最大输出光功率达到 1.73 mW。输出功率稳定性为  $\pm 0.02$  dB, 波长稳定性为 0.05 dB。输出光功率相对于有效的抽运光功率的斜率效率约为 3%。激光器阈

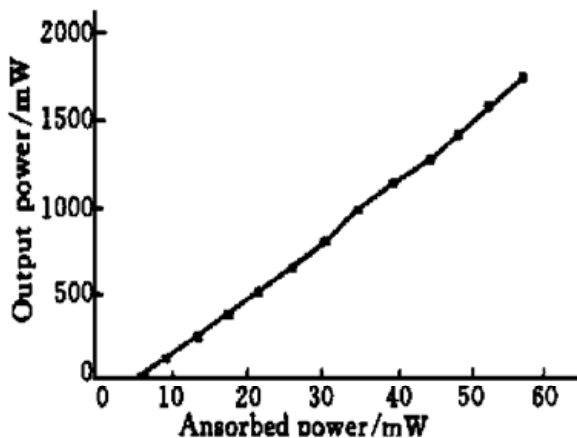


图 6 掺铒光纤激光器功率输出特性  
Fig. 6 Output power of the  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser as a function of absorbed pump power

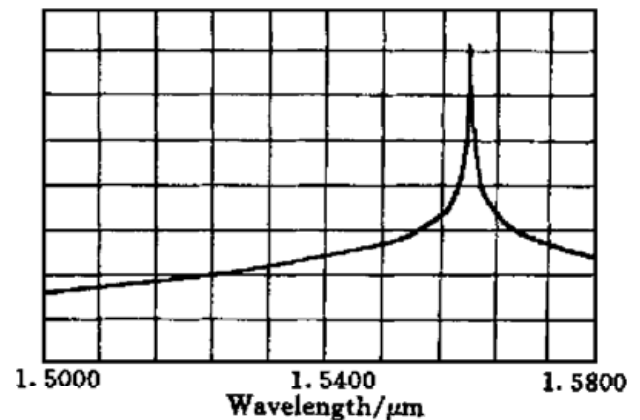


图 7 掺铒光纤激光器输出激光光谱  
Fig. 7 Output spectrum of the  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser

值抽运光功率约为 7 mW。该实验结果与理论计算结果基本相符。进一步降低掺铒光纤与标准通信光纤的熔接损耗, 可减小掺铒光纤激光器的抽运阈值光功率。

掺铒光纤激光器输出激光光谱如图 7 所示。激射波长为 1560.32 nm, 与光纤光栅的 Bragg 波长一致。输出激光谱宽为 0.1 nm(受光谱仪分辨率的限制)。实际线宽应小于此值。抽运源偏流为 120 mA, 输出功率为 1.27 mW。

整个激光器谐振腔结构简单, 且由于光纤光栅 2 为窄带反馈元件, 激射波长精确地由其 Bragg 波长确定。实验发现激光器谱宽与激光输出功率无关。

### 参 考 文 献

- 1 T. Komukai, M. Nakazawa. Tunable single frequency erbium doped fiber ring lasers using fiber grating etalons. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(6A): 679~ 680
- 2 G. A. Ball, W. W. Morey. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23): 1979~ 1981
- 3 P. R. Morkel, G. J. Cowle, D. N. Payne. Travelling-wave erbium fibre ring laser with 60 kHz linewidth. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(10): 632~ 634
- 4 Y. Kimura, K. Suzuki, M. Nakazawa. Laser diode-pumped mirror-free  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(18): 999~ 1001
- 5 L. Reekie, R. J. Mears, S. B. Poole *et al.*. Tunable single-mode fiber laser. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(7): 956~ 960
- 6 Huang Xuanze, Wang Wei, Luo Jie *et al.*. Tunable ring single-mode fiber laser. *Study on Opt. Commun.* (光通信研究), 1994, **18**(2): 121~ 123 (in Chinese)
- 7 N. Kagi. Gain characteristics of  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber with a quasi-confined structure. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(9): 1319~ 1322
- 8 Dong Xiaoyi, Wang Tingyao. New Generational Optical Fiber Communication and SDH—The Principles and Developments. Tianjin: Tianjing Science and Technology Press, 1994. 64~ 69 (in Chinese)
- 9 G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~ 825
- 10 K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau *et al.*. Bragg Gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~ 1037
- 11 R. M. Atkins, V. Mizrahi, T. Erdogan. 248 nm induced vacuum UV spectral changes in optical fibre preform cores: support for a colour centre model of photosensitivity. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 385~ 387

## $\text{Er}^{3+}$ -doped Fiber Laser Based on Fiber Bragg Grating

Guo Yubin

(Department of Communication Engineering, Changchun Institute of Posts and Telecommunications, Changchun 130012)

Kikuchi Kazuro

(Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo, Tokyo 153, Japan)

**Abstract** By using  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber, a single-mode fiber laser based on fiber Bragg grating was developed. When it was pumped by 980 nm laser-diode, the output spectral bandwidth was measured as 0.1 nm at 1.56  $\mu\text{m}$ . The max. output power was measured as 1.73 mW. The power stability is better than  $\pm 0.02$  dB, and the stability of output wavelength is better than 0.05 dB. The laser had a threshold of 7 mW and a slope efficiency of 3%.

**Key words** fiber laser, pump, fiber Bragg grating