

# 短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器

许远忠<sup>1)</sup> 谭华耀<sup>2)</sup> 杜卫冲<sup>3)</sup> 刘水华<sup>1)</sup>

1), 武汉邮电科学研究院器件所, 武汉 430074  
2), 香港理工大学电机工程学系, 香港  
3), 华南师范大学物理系, 广州 510631

**摘 要** 报道采用光敏 Er/Yb 光纤制作短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器的实验结果。激光谐振腔由一对直接写在 30 mm 长的 Er/Yb 光纤上、长度分别为 6 mm 及 10 mm、反射率分别为 90% 及 98.6%、3 dB 带宽分别为 0.28 nm 及 0.26 nm 的光纤布拉格光栅组成, 激光器的泵浦阈值为 8 mW, 斜效率约 14%, 输出光的信噪比为 61 dB, 偏振模抑制比为 30 dB。

**关键词** Er/Yb 辅助掺杂光纤, 光纤布拉格光栅, 光纤光栅激光器。

## 1 引 言

自从紫外光直接写入光纤光栅技术突破以来, 短腔掺铒光纤光栅激光器(EDFGL)的研究逐渐成为光纤激光器领域的一个热点<sup>[1~5]</sup>。

为使厘米级光纤短腔有大的泵浦吸收以提供足够大的激光增益, 90 年代初期, 国际上报道的掺铒光纤光栅激光器大多采用了高 Er 掺杂光纤。为降低腔内损耗往往将一对布拉格光栅直接写在掺 Er 光纤上。然而, 高 Er 掺杂光纤仍不足以在厘米级光纤上提供足够的泵浦吸收, 使得激光器斜率效率低于 1%, 最高输出限制在 -20 dBm 到 -10 dBm 范围<sup>[1, 2]</sup>。为提高输出功率, 往往需要级联一级光纤放大器, 这就是所谓的主振荡功率放大器(MOPA)结构<sup>[3~5]</sup>。另一方面, 高 Er 掺杂光纤固有的离子聚集效应<sup>[6]</sup>既降低了掺铒光纤光栅激光器的量子效率又引起了激光输出的自脉冲<sup>[7]</sup>。尽管这种输出功率的不稳定可以通过泵浦光的反馈调制的方法克服<sup>[3, 4]</sup>, 但整个主振荡功率放大器结构的掺铒光纤光栅激光器就显得更为复杂。引起这些不利因素主要源于掺 Er 光纤的低泵浦吸收效率。

克服上述低泵浦吸收的一个有效方法是采用 Er/Yb 辅助掺杂光纤<sup>[8, 9]</sup>。该光纤具有宽泵浦吸收带宽(800~1100 nm), 在 980 nm 处比普通 Er 掺杂光纤高出两个量级的泵浦吸收强度(典型值为 2 dB/cm)。在 Er/Yb 光纤中, Er 离子的低掺杂浓度避免了激光器的自脉冲效应。短腔光纤激光器的制作需要将一对布拉格光栅焊接在 Er/Yb 光纤两端<sup>[10]</sup>。这就使腔长增长并引入了较大的焊接损耗, 既减弱了短腔的模式选择性, 又降低了激光器效率。Er/Yb 光纤光栅激光器研究中的一个突破性进展是最近成功开发的对紫外感光的新型光纤<sup>[11]</sup>。其纤芯仍

采用 Er/Yb-P/Al/Si 掺杂,但在纤芯外沉积了一层高感光度的 B/Ge/Si 环,使得在 2~3 cm (或更短)光敏 Er/Yb 光纤上直接写入一对布拉格光栅,或由写入的一个布拉格光栅与另一沉积在 Er/Yb 光纤端面的介质反射膜可形成有效的激光振荡腔。这种光纤光栅激光器阈值低(窄于 1 mW),激光输出斜效率高(高于 20%),带宽窄(窄于 100 kHz),调谐范围大(可达 30 nm)。更为重要的是,它可在无需放大、无需反馈的自由运行条件下实现纯单频单偏振模高功率稳定输出<sup>[11~13]</sup>。经在 10 Gbit/s 级通信系统中试验,其传输性能完全可以与半导体激光器相媲美<sup>[13]</sup>,但结构简单,温度及波长选择性更佳,调谐范围更广。它将会在对波长选择要求严格、波长稳定性要求高的应用中(如密集波分复用系统、光纤同轴有线电视系统及相干光纤光雷达系统等)成为半导体分布反馈激光器强有力的竞争对手。

本文报道用光敏 Er/Yb 光纤制作短腔光纤光栅激光器的实验情况。

## 2 Er/Yb 光纤上布拉格光栅的制作

实验中采用的 Er/Yb 光纤纤芯为 Er/Yb-P/Al/Si 掺杂,芯径为 4.66  $\mu\text{m}$ ,外层沉积了高光敏 B/Ge/Si 环,环径约 16  $\mu\text{m}$ ,包层尺寸约 125  $\mu\text{m}$ ,其数值孔径为 0.2,截止波长 1250 nm,在 980 nm 及 1535 nm 处的吸收分别约为 2 dB/cm、0.3 dB/cm。由于 B/Ge/Si 环为高光敏材料,光纤布拉格光栅可直接写在环上,这一光栅亦会对纤芯中的导模形成周期性扰动而等价于光纤纤芯的布拉格光栅。

在短腔光纤光栅激光器中,由两个布拉格光栅组成的激光振荡腔制作工艺相对于采用一个布拉格光栅与一个介质反射镜的方式简单得多。本实验就采用同一模板写入一对光栅。为了提供足够的激光输出,选择其中一个低反射率的布拉格光栅作为激光输出端,另一高反射率布拉格光栅为反射镜。布拉格光栅的峰值反射率  $R_{\max}$  可表示为<sup>[14]</sup>,

$$R_{\max} = \tanh^2(KL) \quad (1)$$

式中  $K = \pi\delta n\eta/\lambda_B$ ,  $\lambda_B$  为布拉格波长,  $\delta n$  为光致折射率的变化,  $\eta$  为光纤的功率导模系数,  $L$  为光栅长度。低反射率的布拉格光栅虽可以选用小的  $\delta n$ ,即短的曝光时间来实现,但此时的有效折射率亦相应减小,其波长将会小于高反射率光栅的布拉格波长,因而这种方式并不足取。为保证两个光栅的反射波长一致,须使两光栅曝光时间相同。由(1)式知,低反射率光栅的制作可以选用较小的布拉格光栅长度  $L$  来实现。用同一块 10 mm 模板制作两个光栅时,低反射率光栅的制作可以在紫外曝光时覆盖 10 mm 模板的一小部分,使其曝光部分长度约为 6 mm。由(1)式知对于强反射光栅,如  $KL = 3$  时,  $R_{\max} = 99\%$ ,而  $KL = 0.6 \times 3 = 1.8$  时,  $R_{\max} = 89\%$ 。

实验中采用的光敏 Er/Yb 光纤长为 30 mm,两端与 SMF-28 光纤焊接。为进一步提高其光敏度,Er/Yb 光纤在紫外曝光前置于  $1.2 \times 10^7$  Pa 的氢气室中 5 天。用 248 nm KrF 准分子激光器,在这段 Er/Yb 光纤上先后制作了一对长度分别为 6 mm 及 10 mm 的布拉格光栅。KrF 准分子激光器的能量为 500 mJ,曝光速率 10 Hz,每个光栅的曝光时间均为 14 min。所制作的光栅相距约 10 mm,各自距与 SMF-28 光纤的焊点约 2~3 mm。

保证两个光栅布拉格波长的一致是制作这种激光器的关键。除使用相同的曝光时间外,制作前后两个光栅时加在光纤上的应力也应不变。并使用低的曝光速率以减少紫外光曝光时所产生的热对布拉格波长的不稳定性影响。

图 1(a)为光栅制作过程中用 1.55  $\mu\text{m}$  光发射二极管监测到的两个光栅重合的透射及反

射谱线, 图 1(b) 为在 10 mm 光栅上稍加应力得到的谱线, 测得 5 mm 及 10 mm 光栅的 3 dB 带宽分别为 0.28 nm 及 0.26 nm。

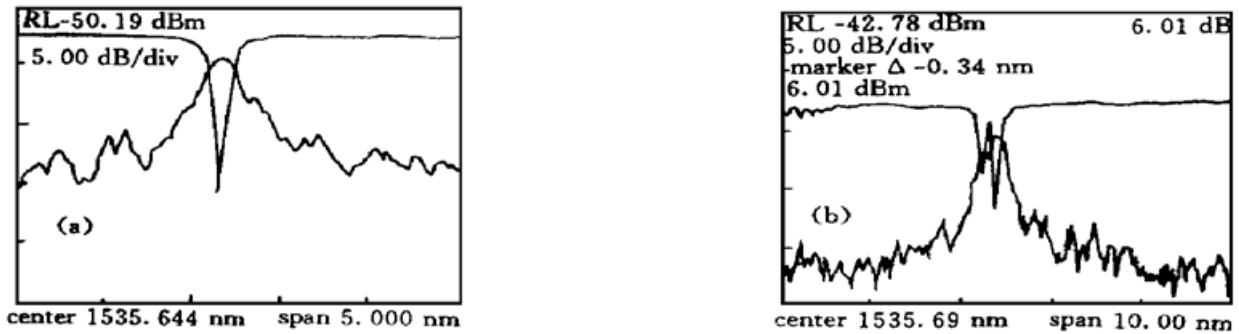


Fig. 1 (a) Overlapped spectra of the two gratings right after UV written; (b) Separate spectra of the two gratings when applying tension to 10 mm grating

### 3 激光器结构及其基本性能

制作完毕后的带布拉格光栅的 Er/Yb 光纤及尾纤自然盘放在光学平台上。如图 2 所示, Er/Yb 光纤由一个 980/1550 波分复用器(WDM)和 980 nm 泵浦激光器相连。为提高 1535 nm 激光输出纯度并避免强 980 nm 泵浦对隔离器的损伤, 实验采用了背向输出方式, 即激光由一个 1550 nm 光隔离器从 980/1550 波分复用的 1550 nm 信号端输出, 光纤谐振腔的低反射输出端(6 mm 光栅)与 980/1550 波分复用器的公共端焊在一起。为防止非匹配端对, 高反射光栅端的尾纤亦焊接上了斜面角连接器并涂上折射率匹配油。

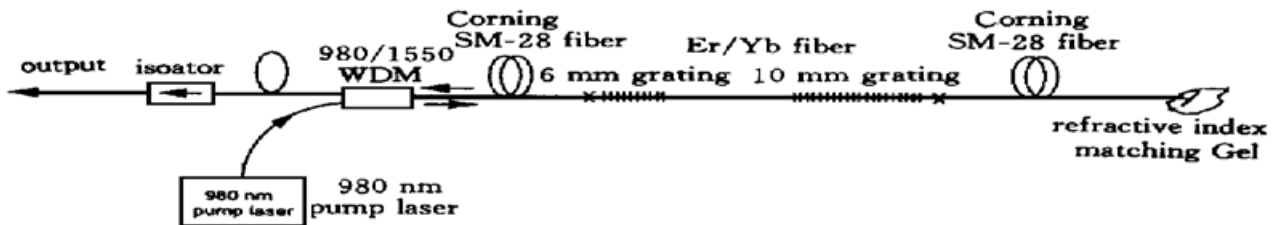


Fig. 2 Setup of the short cavity Er/Yb fiber grating laser

图 3 为激光器输出特性曲线。由曲线可知, 这一激光器的阈值约为 8 mW, 斜效率 14%。从光功率计上读出的光功率起伏小于  $\pm 0.1$  dB 量级。为表征激光器本身的特性, 曲线中的泵浦光功率及 1535 nm 输出功率没有计入有关器件及焊点的插入损耗。相对于 Er/Yb 光纤, 980 nm 泵浦光输入的总插入损耗约为 0.8 dB, 1535 nm 输出总插入损耗约为 3.5 dB。

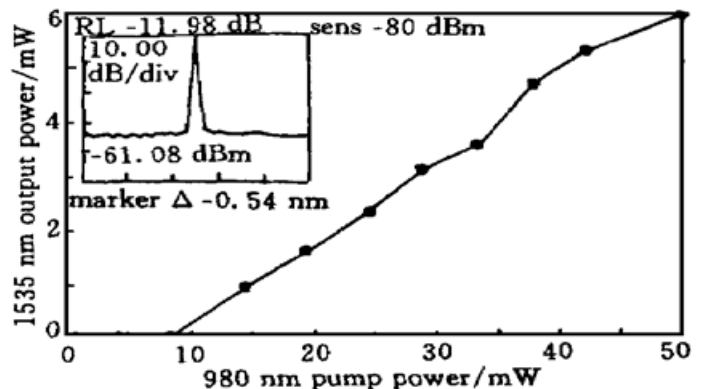


Fig. 3 Output of the short cavity Er/Yb fiber grating laser. The upper left inset shows its lasing spectrum at about 50 mW pumping

图 2 左上角的插图 of Er/Yb 光纤光栅激光器在 50 mW 泵浦光下的输出谱线。采用分辨力为 0.08 nm 的光谱分析仪, 读出其 3 dB 带宽为 0.07 nm, 20 dB 带宽为 0.15 nm, 光信噪比为 61 dB。显然, 3 dB

带宽的测试受限于光谱分析仪的分辨率,更精确的线宽及精细结构的测试需高分辨率的光谱分析仪表。事实上,这种激光器的线宽在几十至几百 kHz 之间<sup>[11-13]</sup>。

实验采用一个偏振控制器及一只带尾纤的与偏振相关的光隔离器,测试了这种光纤激光器的偏振模抑制比。发现激光器在低泵浦光下具有良好单偏振模特性,典型地在 40 mW 泵浦功率下,测得偏振模抑制比约为 30 dB,所测得的抑制比可能受实验中所用的单级光隔离器的限制。而在强泵浦光下,第二个偏振模被激发,如在 50 mW 泵浦下测得的偏振模抑制比约为 8 dB。

**结 论** 用直接写在长 30 mm 的 Er/Yb 光纤上的两个布拉格光栅组成光学谐振腔,研制了一种短腔 Er/Yb 光纤光栅激光器,其阈值约 8 mW,斜效率 14%,输出光信噪比为 61 dB。偏振模抑制比为 30 dB。

### 参 考 文 献

- [1] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6) : 420~ 422
- [2] Zyskind J L, Mizrahi V, DiGiovanni D J *et al.*. Short single frequency erbium-doped fiber laser. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15) : 1385~ 1387
- [3] Mizrahi V, DiGiovanni D J, Atkins R M *et al.*. Stable single-mode erbium fiber grating laser for digital communication. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12) : 2021~ 2025
- [4] Ball G A, Holton C E, Hull-Allen G *et al.*. 60 mW 1.5  $\mu\text{m}$  single-frequency low-noise fiber laser MOPA. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2) : 192~ 194
- [5] Ball G A, Morey W W. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23) : 1979~ 1981
- [6] Delevaque E, Georges T, Monerie M *et al.*. Modeling of pair-induced quenching in erbium doped silicate fibers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(1) : 73~ 75
- [7] Boudec P L, Flohic M L, Sanchez F *et al.*. Self-pulsing in  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser. *Opt. & Quant. Electron.*, 1993, **25**(2) : 359~ 367
- [8] Barnes W L, Poole S B, Townsend J E *et al.*.  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  and  $\text{Er}^{3+}$  doped fiber lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(10) : 1461~ 1465
- [9] Townsend J E, Barnes W L, Jedrzejewski K P *et al.*.  $\text{Yb}^{3+}$ -sensitized  $\text{Er}^{3+}$ -doped silica optical fiber with ultrahigh transfer efficiency and gain. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(21) : 1958~ 1959
- [10] Kringlebotn J T, Morkel P R, Reekie L *et al.*. Efficient diode-pumped single-frequency erbium: ytterbium fiber laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(10) : 1162~ 1164
- [11] Dong L, Loh W H, Caplen J E *et al.*. Efficient single-frequency fiber laser with novel photosensitive Er/Yb optical fibers. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10) : 694~ 696
- [12] Hsu K, Loh W H, Dong L *et al.*. Efficient and tunable Er/Yb fiber grating lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8) : 1438~ 1441
- [13] Loh W H, Samson B N, Dong L *et al.*. High performance single frequency fiber grating-based erbium: ytterbium-codoped fiber lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1) : 114~ 118
- [14] Bennion I, Williams J A R, Zhang L *et al.*. UV-written in-fiber Bragg gratings. *Opt. & Quant. Electron.*, 1996, **28**(2) : 93~ 135

## Short Cavity Er/Yb Fiber Grating Laser

Xu Yuanzhong<sup>1)</sup> Tam Hwayaw<sup>2)</sup> Du Weicong<sup>3)</sup> Liu Suihua<sup>1)</sup>

1), *Passive Devices Division, Wuhan Research Institute of Posts and Telecomm., Wuhan 430074*

2), *Electrical Engineering Department, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong*

3), *Physics Department, South China Normal University, Guangzhou 510631*

(Received 22 April 1998; revised 3 August 1998)

**Abstract** A short cavity Er/Yb fiber grating laser is demonstrated. Its resonant cavity is composed by two Bragg gratings which were UV written directly on a 30 mm photosensitive Er/Yb fiber. The two gratings were ~ 6 mm and 10 mm long, with 90% and 98.6% in reflectivity, 0.28 nm and 0.26 nm in 3 dB bandwidth, respectively. Pumped by a 980 nm diode laser, the associated fiber grating laser exhibits 8 mW threshold, ~ 14% slope efficiency, 30 dB polarisation mode suppression ratio. About 6 mW output power and 61 dB signal to noise ratio were obtained upon the maximum 50 mW 980 pump power in the experiment.

**Key words** erbium/ytterbium codoped fiber, fiber Bragg grating, fiber grating laser.