

# 窄线宽多波长掺铒光纤激光器\*

孙军强<sup>1</sup> 刘德明<sup>1</sup> 黄德修<sup>1</sup> 丘军林<sup>2</sup>

(华中理工大学<sup>1</sup> 光电子工程系, <sup>2</sup> 激光技术国家实验室 武汉 430074)

**提要** 在掺铒光纤线型的单模光纤腔中接续一段多模光纤, 依靠多模光纤中导模的空间模式跳动与激光谐振腔中的偏振烧孔共同作用, 实现了窄线宽多波长的同时激射。激射波长的 3 dB 线宽约为 0.09 nm, 波长间隔为 0.68 nm。

**关键词** 多波长振荡, 窄线宽, 掺铒光纤激光器

## 1 引 言

多波长工作的掺铒光纤激光器有可能代替密集波分复用(DWDM)光纤通信系统中的单个半导体激光器, 近年来引起了研究者的极大兴趣<sup>[1-3]</sup>。然而, 在光抽运下的掺铒光纤是属于均匀加宽的增益介质, 这意味着掺铒光纤激光器的腔内存在着强烈的模式竞争, 单个波长的增益将直接影响腔内所有其他可能振荡波长的增益。要同时实现多波长激射, 必须在腔内引入损耗调制, 并且精确平衡每个波长的增益, 因而难以实现。很多学者提出了不同的方法来实现掺铒光纤激光器的多波长激射。如采用不同增益特性的掺铒光纤<sup>[4]</sup>, 对掺铒光纤进行液氮冷却<sup>[5]</sup>, 以降低均匀加宽的宽度, 减少模式间竞争。将线性增益的掺铒光纤和非线性的 Brillouin 增益相结合等<sup>[6]</sup>。而作为 DWDM 光纤通信系统的光源, 不仅要求多个波长、小的波长间隔、窄线宽以及稳定工作, 而且要求易于操作。我们提出了一种结构简单的线型腔掺铒光纤激光器。依靠多模光纤中空间跳模(mode beating), 与偏振烧孔相结合, 在激光谐振腔内实现动态的梳状滤波器, 获得了窄线宽的三个波长激光的同时输出。

## 2 实验装置及原理

图 1 是多波长窄线宽掺铒光纤激光器的结构示意图。半导体光波导和由光纤耦合器、单模光纤以及光纤偏振控制器构成的光纤环形镜组成了掺铒光纤激光器的反射腔镜。掺铒光纤由 980 nm 的半导体激光器抽运。掺铒光纤的长度为 10 m。光纤环形镜中单模光纤的长度约为 1 km。多模光纤在波长 1.55  $\mu\text{m}$  附近的归一化频率  $V \approx 2.8$ , 长度约为 2 m。激光器输出的光谱由光谱仪作监测和分析。这种线型腔掺铒光纤激光器实现多波长振荡的工作原理可简述如下: 在单模光纤的激光谐振腔内接续一段多模光纤后, 在多模光纤 ( $V \approx 2.8$ ) 中仅有 LP<sub>01</sub> 与 LP<sub>11</sub>

\* 国家自然科学基金(编号: 69778025)资助项目。

收稿日期: 1999-03-12; 收到修改稿日期: 1999-07-02

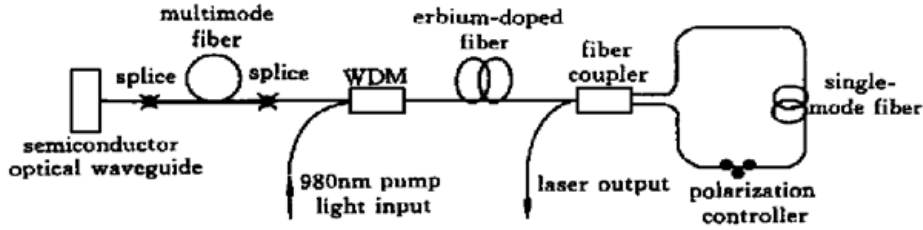


图 1 多波长窄线宽掺铒光纤激光器实验结构图

Fig. 1 Experimental configuration of narrow linewidth and multiwavelength  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber laser

模被激发, 并且它们在传输中产生模式跳变。基模( $\text{LP}_{01}$ )与低阶模( $\text{LP}_{11}$ )的传播常数是不同的, 因而所对应的波长是不同的。随着激光场在谐振腔镜之间的不断反射, 在单模—多模和多模—单模两接续点之间, 由于单模光纤中  $\text{LP}_{01}$  与多模光纤中的  $\text{LP}_{01}$ ,  $\text{LP}_{11}$  之间的耦合损耗是不同的, 在激光器腔中形成与波长有关的传输系数。若选择多模光纤的长度是跳模长度的数倍, 在腔中就构成了动态梳状滤波器。室温下的掺铒光纤是均匀加宽的增益介质, 在腔中梳状滤波器的作用下, 仍然具有模式竞争效应。激光谐振腔内所采用的单模光纤以及多模光纤, 可近似地认为满足弱导条件, 因而基模与低阶模具有很强的偏振灵敏性。利用半导体光波导作反射腔镜, 能成功地稳定激光器的多模振荡。我们认为, 一定偏振态的偏振光入射至半导体光波导后, 在光波导内激励的 TE 和 TM 模将经历不同的线性与非线性相位延迟, 导致输出偏振态的旋转。半导体光波导相当于非线性相位延迟器, 其双折射系数可通过改变半导体光波导上的偏置电流调节。在低的偏置电流下, TM 模的折射系数变化  $\Delta n_{\text{TM}}$  小于 TE 模的折射系数变化  $\Delta n_{\text{TE}}$ <sup>[7]</sup>。通过调节偏置电流, 可获得合适的  $\Delta n_{\text{TM}}/\Delta n_{\text{TE}}$  值, 有利于实现最佳的相位延迟量。除此之外, 非线性相位延迟量还和注入半导体光波导的光功率、光的偏振态有关, 这就决定了激励的 TM 模与 TE 模的幅度比值。依靠光纤环形镜中偏振控制器的调节作用, 可改变入射至光波导的光偏振状态与强度。根据入射光的偏振态与入射强度的不同, 经半导体光波导反射后, 输出光的偏振态及反射系数也不同, 形成了对光强与偏振态有选择性的反馈<sup>[8]</sup>, 极大地增强了激光谐振腔内的光强和偏振态的非均匀性。从而在均匀加宽的掺铒光纤增益介质中产生偏振烧孔, 均匀加宽的线宽将被减小。锁定了偏振烧孔的位置, 从而抑制了模式竞争, 稳定了激光器的多波长振荡。

### 3 实验结果及分析

图 2 为在掺铒光纤激光器的谐振腔中不采用多模光纤, 而是直接利用单模光纤, 即在无选模、限模元件情况下, 激光器输出的光谱。从光谱的结构中可以看出, 谱线较宽, 各个纵模间隔及线宽都不相等, 这主要是掺铒光纤在室温下属于均匀加宽的增益介质, 存在着强烈的模式竞争。图 3 为在激光器谐振腔中接入一段多模光纤后, 调节偏振控制器时获得的单纵模光谱, 其 3 dB 的线宽仅有 0.09 nm, 在该偏振状态下对偏振控制器进行微调。实验发现, 单纵模的谱结构可从一个波长跳变到另一个波长, 这也意味着, 腔存在着与光的偏振态有关的滤波机制。进一步改变腔内光的偏振状态, 改变半导体光波导上的偏置电流(1~10 mA), 可获得如图 4(a), (b) 所示的 2 波长和 3 波长输出的光谱结构。波长之间的间隔为 0.68 nm, 线宽约为 0.1 nm, 而且波长所对应的峰值光功率很接近。因此我们认为, 在包含有多模光纤的激光谐振腔

中,可构成与模式跳变有关的梳状滤波器。基模与低阶模在多模光纤中以不同的传输常数传输,存在着一跳模长度  $l_B = 2\pi/\Delta\beta$ ,  $\Delta\beta$  为  $LP_{01}$  模与  $LP_{11}$  模的传输常数差。在典型的光纤中其跳模长度约为几百微米量级,当多模光纤长度为该跳模长度的整数倍时,便形成了与波长有关的梳状滤波效应。由于在半导体光波导与光纤环形镜中偏振控制器共同调节下,增强了腔内的偏振非均匀性,减少了均匀加宽的宽度。使得激光器的模式竞争得到抑制,从而稳定了激光器的多模同时振荡。实验还发现,多波长振荡的间隔还与多模光纤的长度有关。减少多模光纤的长度,模式间的间隔也随之增加,由 0.68 nm 增加到 0.74 nm。这也同 K. Liu 等<sup>[9]</sup>的理论预测相吻合。

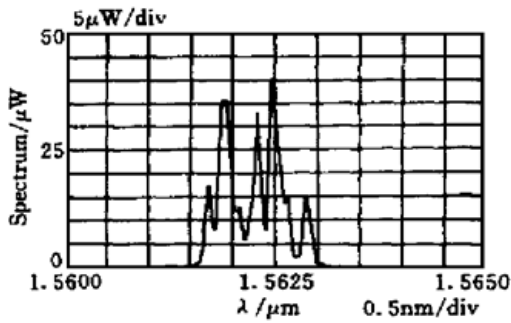


图 2 腔内仅有单模光纤时掺铒光纤激光器的光谱  
Fig. 2 Optical spectrum of the  $Er^{3+}$ -doped fiber laser when the cavity contains only single-mode fiber

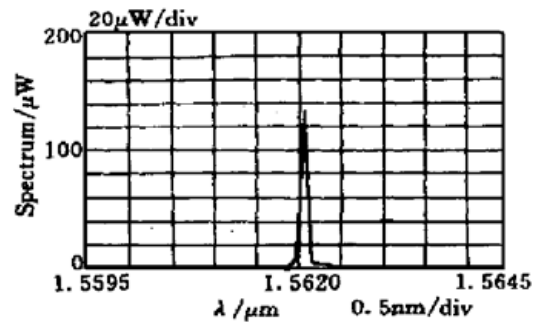


图 3 腔内接续一段多模光纤后掺铒光纤激光器输出的单纵模窄线宽光谱  
Fig. 3 Narrow linewidth single mode spectrum of the  $Er^{3+}$ -doped fiber laser when the cavity contains a length of multimode fiber

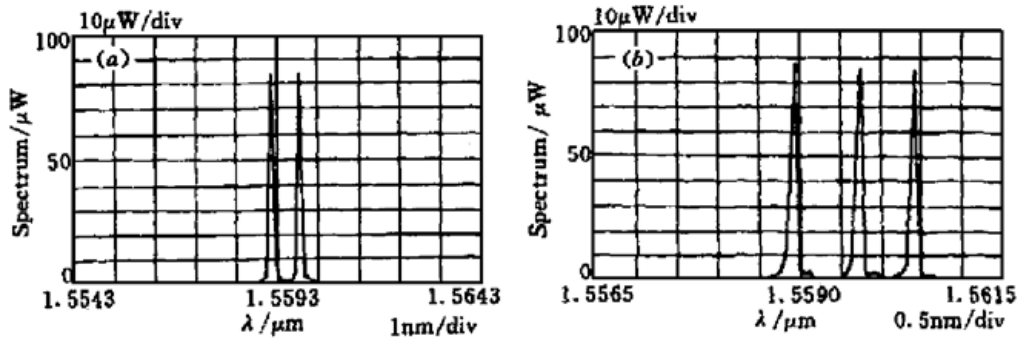


图 4 腔内接续一段多模光纤后掺铒光纤激光器输出的多波长光谱  
(a) 2 波长; (b) 3 波长

Fig. 4 Multiwavelength spectrum of the  $Er^{3+}$ -doped fiber laser when the cavity contains a length of multimode fiber  
(a) dual-wavelength; (b) triple-wavelength

## 参 考 文 献

- 1 N. Park, J. W. Dawson, K. J. Vahala. Multiple wavelength operation of an erbium-doped fiber laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, 4(6): 540~ 541
- 2 J. Chow, G. Town, B. Eggleton *et al.*. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(1): 60~ 62
- 3 O. Graydon, W. H. Loh, R. I. Laming *et al.*. Triple-frequency operation of an Er-doped twincore fiber loop laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(1): 63~ 65
- 4 T. Miyazaki, N. Edagawa, S. Yamamoto *et al.*. A multiwavelength fiber ring-laser employing a pair of

- silica-based arrayed-waveguide-gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7):910~ 912
- 5 S. Yamashita, K. Hotate. Multiwavelength erbium-doped fiber laser using intracavity etalon and cooled by liquid nitrogen. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(14):1298~ 1299
- 6 S. Yamashita, G. J. Cowle. Bidirectional 10-GHz optical comb generation with an intracavity fiber DFB pumped Brillouin/erbium fiber laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6):796~ 798
- 7 K. S. Jepsen, N. Storkfelt, M. Vaa *et al.*. Polarization dependence of linewidth enhancement factor in InGaAs/InGaAsP MQW material. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(3):635~ 639
- 8 Sun Junqiang, Huang Zhijian, Huang Dexiu. Optical modulators using semiconductor waveguide in fiber ring lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(1):56~ 61 (in Chinese)
- 9 K. Liu, M. Digonnet, K. Fesler *et al.*. Broadband diode-pumped fiber laser. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(14):838~ 840

## Multiwavelength Er<sup>3+</sup>-doped Fiber Lasers with Narrow Linewidth

Sun Junqiang<sup>1</sup> Liu Deming<sup>1</sup> Huang Dexiu<sup>1</sup> Qiu Junlin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Engineering, <sup>2</sup>National Laboratory of Laser Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** A method to incorporate a length of multimode fiber into a single-mode fiber linear cavity of Er<sup>3+</sup>-doped fiber lasers is proposed in the paper. Simultaneous multiwavelength stimulation is achieved by combining spatial mode beating among guided modes with the polarization hole burning in the laser cavity. The 3-dB spectral linewidth is approximately 0.09 nm with wavelength spacing of 0.68 nm.

**Key words** multiwavelength stimulation, narrow linewidth, Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser