

# 高频调制大功率窄线宽分布反馈光纤激光器\*

薛力芳<sup>†</sup> 张强 李芳 周燕 刘育梁

(中国科学院半导体研究所, 光电系统实验室, 北京 100083)

(2010年1月27日收到; 2010年3月17日收到修改稿)

研制了一种窄线宽光纤激光器. 在有源相移光栅后加一段掺铒光纤, 当用 980 nm 抽运光注入时, 首先形成了分布反馈(DFB)光纤激光器, 而残余抽运光将铒纤中铒离子从基态抽运到了激发态, 对 DFB 激光实现了有效放大, 实现了对残余抽运光的充分利用, 节省了功耗、降低了成本; 同时利用温控技术克服了 DFB 光纤激光器的温度敏感问题; 将相移光栅黏贴于片状压电陶瓷(PZT)的表面实现了高频调制. 实验研制的激光器的最高调制频率为 2 kHz, 输出功率为 15.6 dBm, 线宽为 300 kHz.

**关键词:** 分布反馈光纤激光器, 窄线宽, 大功率, 高频调制

**PACS:** 42.60.By

## 1. 引言

基于稀土离子掺杂光纤光栅研制的 DFB 光纤激光器具有线宽窄、微型化、与标准通信光纤兼容性好等优点可广泛用于 WDM 光通信系统、相干检测、光传感等领域. 与其他光纤激光器相比, DFB 光纤激光器的优点在于它只用一个光栅就能实现反馈和波长选择, 容易获得单纵模的激光输出, 而且频率稳定性更好. 但是 DFB 光纤激光器具有如下缺点: 1) 输出功率小, 市场上掺铒光纤的光敏性差, 同时由于腔长短, 导致出纤功率较小, 因此为了实现大功率激光输出就必须对其出射激光进行放大; 2) DFB 光纤激光器的波长还具有温度敏感特性, 为了实现稳频输出, 必须对其进行温度控制; 3) DFB 光纤激光器还具有应力敏感特性, 我们可以利用此特性, 将 DFB 光纤激光器黏贴于 PZT 上, 实现高频调制.

本文通过对 DFB 光纤激光器进行温控、压电陶瓷高频调制、外加 EDFA 放大的方法研制一种窄线宽光纤激光器, 输出激光的线宽仅为 300 kHz、最高调制频率为 2 kHz、功率为 15.6 dBm.

## 2. 原理

在有源 FBG 的中间引入  $\pi/2$  相移, 当抽运光注入时, 将产生单模激光输出形成 DFB 光纤激光器. 因此对 DFB 光纤激光器的分析是基于  $\pi/2$  相移光栅的传输特性进行的.

相移光栅是在常规光纤布拉格光栅(FBG)的某一特定部位引入一定的相移, 产生两个相互异相的光栅, 这两个相互异相的光栅类似于波长选择 Fabry-Perot 谐振腔, 允许谐振波长的光注入到 FBG 的阻带, 在阻带中打开一个线宽极窄的透射窗口<sup>[1]</sup>.

描述相移光栅的耦合波理论主要以 Agrawal 等人<sup>[2]</sup>和 Turan<sup>[3]</sup>为代表, Agrawal 的理论主要应用于相移光栅, 而 Turan 的理论可适用于各种光纤光栅<sup>[4-6]</sup>, 研究相移光栅的方法主要有传输矩阵法<sup>[7,8]</sup>和多层薄膜模型<sup>[9,10]</sup>. 传输矩阵法用来分析复杂结构的光栅具有直观、快捷、准确性高的特点. 因此, 我们可先根据耦合模理论得出均匀光栅的矩阵表达式, 然后在此基础上利用传输矩阵法得到相移光栅的矩阵表达式. 最后可得到相移光栅光波场幅度的反射系数<sup>[11]</sup>.

\* 第二批中国博士后科学基金(批准号:200902129), 中科院知识创新工程国防科技创新重要方向项目(批准号:09JA011001)和国家高技术研究发展计划(863计划)(批准号:2009AA03Z442)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: lfxxue@semi.ac.cn

$$r = \frac{ik \{ [\alpha \cosh(\alpha l_2) - i\sigma \sinh(\alpha l_2)] \cdot \sinh(\alpha l_1) + [\alpha \cosh(\alpha l_1) + i\sigma \sinh(\alpha l_1)] \cdot \sinh(\alpha l_2) e^{i2\varphi} \}}{[\alpha \cosh(\alpha l_1) - i\sigma \sinh(\alpha l_1)] \cdot [\alpha \cosh(\alpha l_2) + i\sigma \sinh(\alpha l_2)] + k^2 \sinh(\alpha l_1) \sinh(\alpha l_2) e^{i2\varphi}},$$

式中  $\alpha^2 = k^2 - \sigma^2$ ,  $k = \pi \Delta n / \lambda_B$  为光栅耦合系数,  $\sigma = 2\pi n_{\text{eff}}(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$  为距离布拉格波长的偏移量,  $l_1$ ,  $l_2$  分别为相移位置两侧光栅的长度,  $\varphi$  为相移量. 在上式中, 当  $l_1, l_2$  或  $\varphi$  三个参数中任一个取零时,  $r$  就回到单段均匀光栅的情况. 当  $l_1 = l_2$  且  $\varphi = \pi/2$  时, 在光栅阻带的正中布拉格波长上有一个线宽很窄的透射峰, 透射峰的波长等于布拉格的波长, 透射峰的幅度接近 100%. 产生透射峰后, 光栅反射带宽展宽了, 而且反射率的峰值有所下降. 图 1 为引入相移前(虚线)和引入相移后(实线)光栅的反射谱曲线<sup>[12]</sup>.

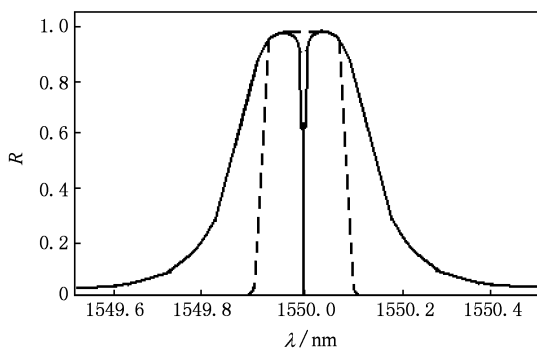


图 1 引入  $\pi/2$  相移前(虚线)和引入相移后(实线)光栅的反射谱曲线

若有源光纤上写入  $\pi/2$  相移光栅, 当有满足波长条件的抽运光输入时, 即可得到窄线宽的激光输出.

### 3. 实验装置

窄线宽光纤激光器的整体设计如图 2 所示, DFB 光纤激光器是在载氢后的掺铒光纤写制的  $\pi/2$  相移光栅, 当相移光栅受到外界温度、声音、振动的影响时会发生波长的不稳定, 因此在相移光栅上需要做温控、隔声隔振的封装, 并且通过温度的控制

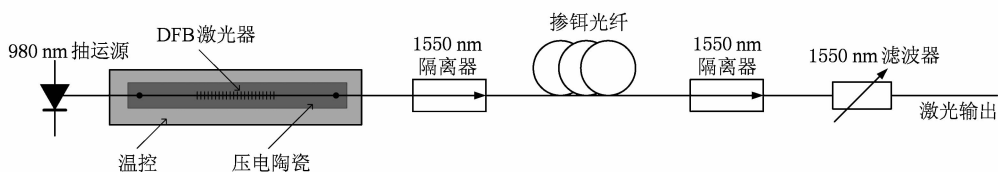


图 2 窄线宽光纤激光器整体结构示意图

可以达到激光器波长调谐的目的. 此外, 为了实现激光器的高频调制, 还需在激光器的封装中加入高频调制装置, 在此设计中采用压电陶瓷 (PZT) 实现高频调制. DFB 光纤激光器由 980 nm 光抽运, 在后端加入掺铒光纤实现功率的放大, 同时在光路中加入适当的隔离器以减少回波, 提高激光器的整体性能.

### 4. 实验结果

将 DFB 光纤激光器的两端刚性黏贴于厚度方向极化的片状 PZT 的上表面, PZT 由高频正弦电压驱动, 从而带动 DFB 光纤激光器的输出光波长出现相应的正弦调制. 在实验中使用高频解调系统探测经高频调制的激光输出.

对 PZT 驱动电压的峰峰值为 2 V 时的各频段的调制特性进行了测试, 结果如图 3 所示, 从图中可以看出, 在 50—2000 Hz 的调制频段内调制幅度均较平坦.

实验中使用高频解调系统针对 200 Hz 和 350 Hz 两个调制频率在不同 PZT 调制电压下的调制幅度进行了测试, 测试结果如图 4 和 5 所示. 图中标出了多次测量后的标准偏差. 实验证实频率稳定性与光纤激光器和 PZT 之间的黏贴方式有关, 经多次验证, 使用 353ND 胶水将剥去涂覆层的光纤黏贴在 PZT 表面的方法得到的频率稳定性较好. 在图中的最上端斜率为零是由于该处的调制幅度已超出了解调系统的动态范围. 去除超出动态范围的数据点可以得到调制幅度随 PZT 调制电压成线性变化, 其线性拟合度分别为 99.562% 和 99.552%. 因此, 可通过提高调制电压的方法增大输出激光的调制幅度. 除此之外, 还可通过选用刚性更好的胶水或压电常数较大的 PZT 以提高调制幅度.

采用外差探测的方法对激光器的线宽进行了测

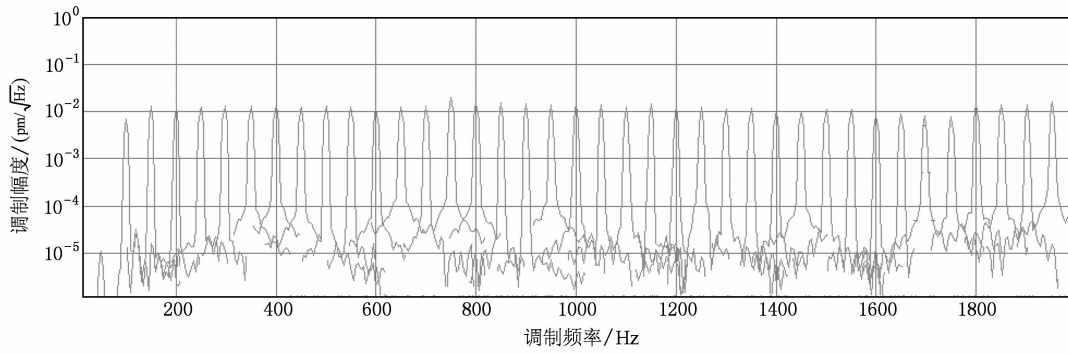


图3 电压的峰值是2 V时的各频段调制特性的测试

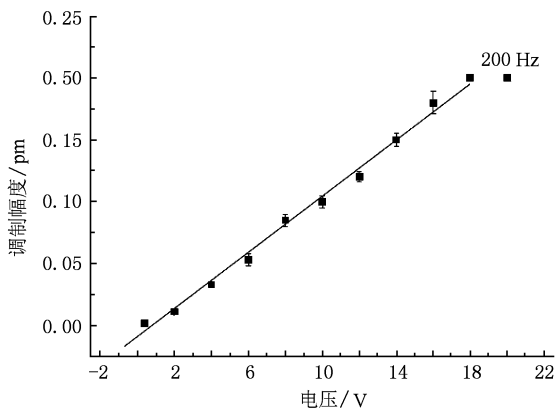


图4 调制频率在 200 Hz 时不同电压下的调制幅度

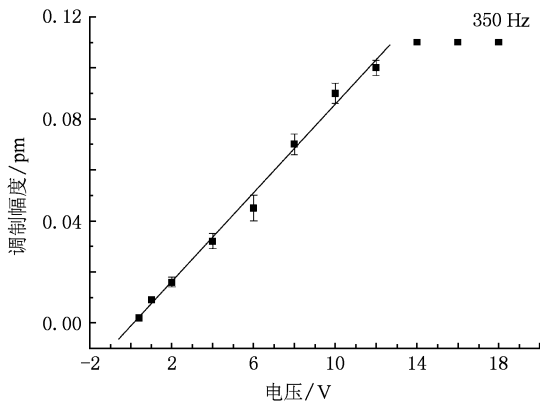


图5 调制频率在 350 Hz 时不同电压下的调制幅度

试,测试结果如图6和7所示.由功率为25 dBm的980 nm抽运光的DFB光纤激光器的功率为-8 dBm,线宽为3 kHz,可见DFB光纤激光器的线宽是非常窄的,但输出功率较小.经EDFA放大后,功率被放大到15.6 dBm,放大了23 dB,线宽展宽到300kHz.虽然输出激光的线宽虽被放大器展宽了

100倍,仍然比半导体DFB激光器的线宽窄两个量级.如此窄线宽的光纤激光器具有广泛的应用价值,例如,300 kHz线宽的激光的相干长度可达到1 km,可应用于激光测距或干涉测量,同时此线宽由于远远小于气体吸收谱的线宽可被广泛应用于气体探测.

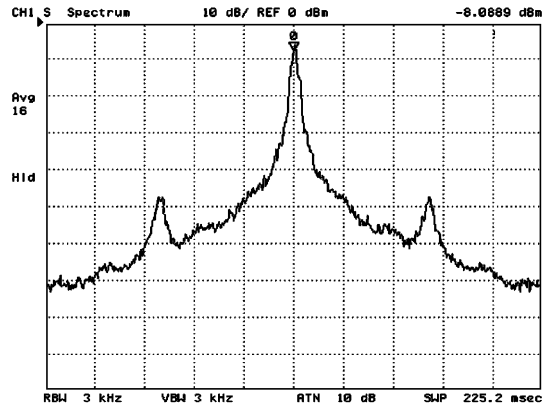


图6 DFB 光纤激光器的线宽

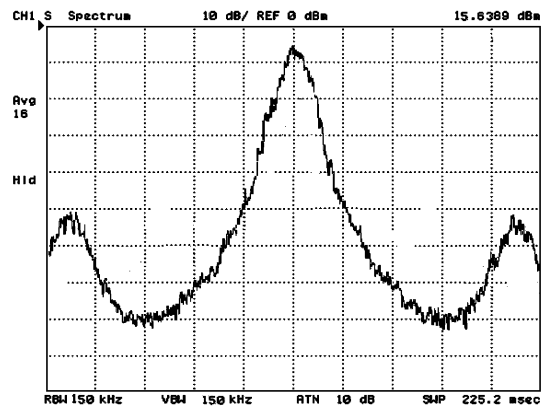


图7 DFB 光纤激光器加 EDFA 放大后的线宽

## 5. 结 论

研制了一种窄线宽光纤激光器,当DFB光纤激光器由功率为25 dBm的980 nm抽运光源输入时,其输出功率为-8 dBm,线宽为3 kHz.为了增大激光器的输出功率并有效利用泵源的输出功率,在DFB光纤激光器后加了EDFA放大,放大后激光的

功率达到15.6 dBm,线宽被展宽到300 kHz.将此高功率、窄线宽DFB光纤激光器封装到PZT上实现50—2000 Hz的调制,得到非常平坦的调制幅度.并且利用温控技术克服了DFB光纤激光器的温度敏感问题.本文所研制激光器具有功率大、线宽窄、功率高、性能稳定等优点可被广泛应用在激光测距、干涉测量、激光雷达等领域.

- 
- [1] Zhou S L 2003 *Optical Communication Technology* **4** 47 (in Chinese) [同少玲 2003 光通信技术 **4** 47]
- [2] Agrawal G P, Bobeck A H 1988 *IEEE Journal of Quantum Electron* **24** 2047
- [3] Turan E 1997 *Journal of Lightwave Technology* **15** 1277
- [4] Li H P, Wang Q Y, Qin L, Wei Z X, Zhang Y S 2001 *Journal of Optoelectronics·Laser* **12** 26 (in Chinese) [李惠萍、王庆亚、秦莉、韦占雄、张玉书 2001 光电子·激光 **12** 26]
- [5] He J L, Sun X H 2000 *Chinese Journal of Electron Devices* **23** 90 (in Chinese) [何瑾琳、孙小菡 2000 电子器件 **23** 90]
- [6] Xu X H, Cui Y P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 96 (in Chinese) [徐新华、崔一平 2002 物理学报 **52** 96]
- [7] Wang Y, Ye Z Q 2002 *Journal of Optoelectronics·Laser* **13** 679 (in Chinese) [王燕、叶志清 2002 光电子·激光 **13** 679]
- [8] Zhao D H, Yang X F, Liu Z G, Li Z H, Ge C F, Shen Q Q, Lv K C, Dong X Y 1998 *Journal of Optoelectronics·Laser* **9** 177 (in Chinese) [赵东晖、杨秀峰、刘志国、李智红、葛春风、盛秋琴、吕可诚、董孝义 1998 光电子·激光 **9** 177]
- [9] Han Q, Lv K C, Li Y G 2003 *Journal of Optoelectronics·Laser* **14** 41 (in Chinese) [韩群、吕可诚、李乙刚 2003 光电子·激光 **14** 41]
- [10] Zhou C H, Wang L, Nie Y, Wang Z H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 68 (in Chinese) [周传宏、王磊、聂娅、王植恒 2002 物理学报 **51** 68]
- [11] Weller-Brophy L A, Hall D G 1985 *Journal of the Optical Society of America A* **2** 863
- [12] Agrawal G P, Radic S 1994 *IEEE Photonics Technology Letters* **6** 995

## High-frequency modulation, high-power and narrow-linewidth distributed feedback fiber laser\*

Xue Li-Fang<sup>†</sup> Zhang Qiang Li Fang Zhou Yan Liu Yu-Liang

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(Received 27 January 2010; revised manuscript received 17 March 2010)

### Abstract

A kind of narrow-linewidth fiber laser was developed. A segment of Er-doped fiber is connected after the active phase-shifted fiber grating. A distributed feedback (DFB) fiber laser is realized using a 980 nm laser for pump. The erbium ions in the Er-doped fiber are pumped from ground-state to excited state by the residual pump power, so the output power of the DFB fiber laser is amplified effectively, and the pump power is fully used. In this way, the power consumption and the cost are reduced greatly. Temperature-control technique is used to deal with the temperature-sensitivity of the DFB fiber laser. The high-frequency modulation is realized by using a piezo-electric actuator when the phase-shifted fiber grating is mounted on its surface. In our experiment, the highest modulation frequency, the output power and the linewidth of the fiber laser are 2 kHz, 15.6 dBm and 300 kHz, respectively.

**Keywords:** distributed feedback fiber laser, narrow-linewidth, high-power, high-frequency modulation

**PACS:** 42.60. By

---

\* Project supported by the Special Foundation of China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 200902129), Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences, the main aspect of science and technology innovation in national defence (Grant No. 09JA011001) and National High-tech R&D Program of China (863 Program) (Grant No. 2009AA03Z442).

<sup>†</sup> E-mail: lfxue@semi.ac.cn