

文章编号: 0258-7025(2003)01-0005-04

# 利用 AOTF 的可调谐光纤激光器的特性研究

胡斌, 胡鸿璋, 林航友

(天津大学理学院, 天津 300072)

**摘要** 提出了一种新型的可调谐光纤激光器, 其谐振腔是由声光可调谐波长滤波器(AOTF)和掺铒光纤构成的 Fabry-Perot 腔。该激光器具有调谐方便, 调谐速度快和调谐范围大的优点。在忽略激发态吸收和放大的自发辐射情况下, 对该激光器的线宽和调谐特性以及阈值抽运功率和斜率效率进行了理论计算。在中心工作波长 1550 nm 处, 得到输出峰值的半极大值线宽(FWHM)约为 0.26 nm, 并且在 1550 nm 附近, 声波频率每改变 1 MHz 所调谐的峰值波长间隔约为 8.95 nm。理论上, 调谐范围只受掺铒光纤增益和滤波器带宽的限制。计算结果表明, 该激光器的阈值抽运功率和斜率效率分别为 0.795 mW 和 15.15%。

**关键词** 光电子技术; 可调谐光纤激光器; 声光可调谐滤波器; Fabry-Perot 谐振腔; 掺铒光纤

**中图分类号** TN 248.1; TN 713+.7 **文献标识码** A

## Study on Characteristics of Tunable Fiber Laser Employing AOTF

HU Bin, HU Hong-zhang, LIN Hang-you

(College of Natural Sciences, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A new-style tunable fiber laser in which an acoustooptic tunable filter (AOTF) and an erbium-doped fiber combine to form a Fabry-Perot resonator is presented and theoretically investigated in this article. It has wide tunable range and can be conveniently and rapidly tuned by changing the acoustic frequency. Under neglecting excited-state absorption (ESA) and amplification of spontaneous emission (ASE), the linewidth, tunable characteristic, pump threshold and slope efficiency of the laser have been calculated. At the center wavelength of 1550 nm, an output peak with a FWHM of 0.26 nm is obtained; the tuned peak gap is about 8.95 nm when the acoustic frequency is changed 1 MHz. Theoretically, the tunable range is confined only by erbium-doped fiber gain and filter bandwidth. The calculational results indicate the pump threshold and slope efficiency of this laser are 0.795 mW and 15.15%, respectively.

**Key words** optoelectronic technique; tunable fiber laser; acoustooptic tunable filter; Fabry-Perot resonator; erbium-doped fiber

## 1 引言

光纤激光器波长的调谐输出, 以往大多采用插入光栅等分立器件或使用温度控制等方法进行调谐<sup>[1]</sup>, 也有使用偏振控制器粗调再用压电陶瓷和电光位相调制器进行细调的<sup>[2]</sup>, 都存在调节不方便的缺点, 而且器件大都由多个分立器件组成, 难以集成。本文采用掺铒光纤和声光可调谐波长滤波器(AOTF)组合成线性 Fabry-Perot 谐振腔来实现可调

谐的激光输出。它具有调谐方便, 调谐速度快和调谐范围大的优点, 且能得到很好的调谐输出的激光, 器件还易于集成。

## 2 理论分析

图 1 表示由掺铒光纤与两级 AOTF 组成的 Fabry-Perot 谐振腔。其中, 两级 AOTF 是在我们研制成的器件<sup>[3]</sup>的基础上扩展而成的, 其结构如图 2 所

收稿日期: 2001-11-19; 收到修改稿日期: 2002-01-06

作者简介: 胡斌(1977-), 男, 天津大学理学院光学与光电子学专业硕士研究生, 目前主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail: schubin@eyou.com

示。两级 AOTF 的优点,除了滤出带宽窄之外,还可以补偿由于声光效应引起的光波频率的改变<sup>[4]</sup>。图 1 中的箭头方向表示光波的传输方向,  $L$  为掺铒光纤长度,  $L_f$  为单级 AOTF 的长度;  $r_i, t_i$  ( $i = s_1, s_2, p_1, p_2$ ) 分别表示两个反射镜面处的信号光与抽运光的振幅反射系数和透射系数。

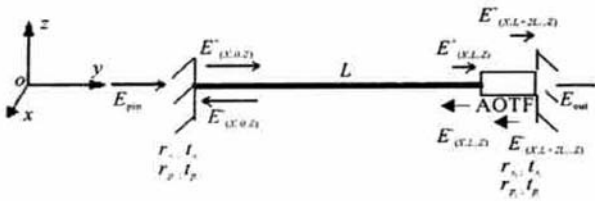


图 1 声光可调谐光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of the acoustooptic tunable fiber laser

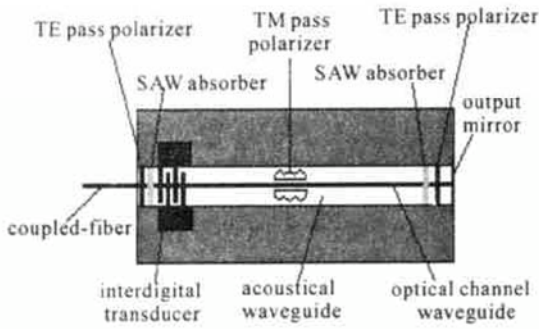


图 2 两级声光可调谐波长滤波器的结构

Fig. 2 Configuration of the two stages AOTF

采用 980 nm 抽运, 信号光中心波长为 1550 nm。当抽运光和信号光在光波导中来回传播时, 它们的光强分布由下式给出<sup>[5]</sup>

$$I_i(y) = \frac{c\epsilon_0}{2} n_i |E_i^+(y) + E_i^-(y)|^2 \quad (i = s, p, \text{下同}) \quad (1)$$

式中,  $s$  和  $p$  分别表示信号光和抽运光,  $c$  为真空中的光速,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $n_i$  分别为信号光和抽运光的折射率,  $E_i$  为谐振腔电场, “+”和“-”分别表示沿 + $y$  和 - $y$  方向传输的光束。掺铒光纤的增益是信号光强  $I_s$  的函数, 因此采用光束传播法, 逐段计算。采用高斯光束近似<sup>[1]</sup>, 它在单模光纤中传播时, 横截面上的分布始终是相似的, 通常的快速傅里叶变换光束传播法 (FFT-BPM) 中的傅里叶变换可以省去, 使计算得到极大的简化。令谐振腔中的电场为

$$E_i^+(y) = A_i^+(y) \exp\left[-\frac{r^2}{2w_i^2}\right] \exp(-i\beta_i y) \quad (2)$$

$$E_i^-(y) = A_i^-(y) \exp\left[-\frac{r^2}{2w_i^2}\right] \times$$

$$\exp[-i\beta_i[(2L-y) + 2 \cdot 2L_f]] \quad (3)$$

式中  $w_i$  和  $\beta_i$  分别代表信号光和抽运光的光斑尺寸和传播常数, 它们可以由光纤中与基模高斯光束相关的波动方程得到<sup>[1]</sup>。由于是基模高斯光束, 只需要知道光纤轴上的复振幅, 就能了解整个截面上的模场分布。又因为光纤与 AOTF 联接处使用了折射率匹配的紫外胶, 在计算时可以忽略该处的反射。边界条件为

$$A_p^+(0) = A_{\text{pin}}, \quad A_s^+(0) = r_{s1} \cdot A_s^-(0)$$

$$A_s^-(L + 2L_f) = r_{s2} \cdot A_s^+(L + 2L_f) \quad (4)$$

按光束传播法分段计算, 在光纤轴上某一点  $(0, y, 0)$  处的振幅为

$$A_s^+(y) = A_{s(y-dy)}^+ \exp\left\{\frac{1}{2}[G_{(y-dy)} - \alpha(\nu_s)]dy\right\} \quad (5)$$

$$A_s^-(y) = A_{s(y+dy)}^- \exp\left\{\frac{1}{2}[G_{(y+dy)} - \alpha(\nu_s)]dy\right\} \quad (6)$$

$$A_p^+(y) = A_{p(y-dy)}^+ \exp\left[-\frac{1}{2}\alpha(\nu_p)dy\right] \quad (7)$$

式中  $\alpha(\nu_s)$  为信号光在光纤中的损耗系数, 按当前的制作工艺, 此损耗是可以忽略的; 信号光增益系数  $G_{(y)}$  和抽运光的衰减系数  $\alpha(\nu_p)$  已由文献[6]给出。

在 AOTF 处有

$$A_s^+(L) \cdot \eta \cdot (1 - \xi)^{1/2} = A_s^+(L + 2L_f) \quad (8)$$

$$A_s^-(L) = A_s^-(L + 2L_f) \cdot \eta \cdot (1 - \xi)^{1/2} \quad (9)$$

上面两式中  $\xi$  为两级 AOTF 的单程损耗,  $\eta$  为一级 AOTF 的模转换效率<sup>[3]</sup>

$$\eta = (FL_f)^2 \frac{\sin^2(\theta)}{\theta^2} \quad (10)$$

式中  $F$  为声光耦合系数, 且一般满足  $FL_f = \frac{\pi}{2}$ , 另外

$$\theta = [(FL_f)^2 + (\Delta\beta L_f/2)^2]^{1/2} \quad (11)$$

其中相位失配因子  $\Delta\beta$  由下式给出

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - \frac{2\pi}{\Lambda_a} \quad (12)$$

这里,  $\lambda$  为信号光波长,  $\Delta n = |n_{\text{TE}} - n_{\text{TM}}|$  为信号光的 TE 模和 TM 模的有效折射率之差,  $\Lambda_a$  为声波波长。

信号光在谐振腔中来回反射, 逐渐放大并形成振荡。当相邻两次出射的光功率相对差值小于 0.005 时, 输出的功率即为激光器的稳态输出功率。另外, 此激光器的阈值抽运功率和斜率效率分别为<sup>[7]</sup>

$$P_{\text{th}} = \frac{h\nu_p}{\eta_p \cdot \sigma_{\text{em}} \cdot \tau} \cdot \frac{\delta}{2} \cdot A_{\text{eff}} \quad (13)$$

$$s = \eta_p \cdot \frac{1 - r_{s2}^2}{\delta} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda} \quad (14)$$

式中  $\eta_p$  为抽运量子效率,  $A_{\text{eff}}$  为有效抽运面积,  $\delta$  为受激辐射光在谐振腔中往返一次的损耗, 且  $\delta = 2 \cdot \alpha(\nu_s) \cdot L - 2 \ln[r_{s1} \cdot r_{s2} \cdot \eta \cdot (1 - \xi)^{1/2}]$ 。

### 3 计算结果

单模掺铒光纤均匀掺杂的芯层半径为  $2.2 \mu\text{m}$ , 包层半径为  $64 \mu\text{m}$ , 芯层与包层的折射率差为  $0.01$ 。通常情况下, 谐振腔的两端面镜采用双色镜, 以使信号光能在谐振腔中来回反射形成振荡, 另一方面使抽运光在谐振腔中呈行波传输。如果入射端面对抽运光的透过率不为  $1$ , 只影响有效抽运功率, 对信号光的其他方面没有影响; 相应的, 假如出射端面对抽运光的透过率不为  $1$ , 由于增益介质对抽运光的吸收很强, 抽运光通过增益介质后再经出射端面反射回来也可以忽略不计。因此在计算时, 可以假设两端面镜对抽运光的透过率  $t_{p1} = t_{p2} = 1$ 。这不仅是实际运用的需要, 同时也可以使理论计算得到简化。

设由自发辐射产生的初始小信号光功率为  $0.1 \mu\text{W}$ , 抽运光功率为  $100 \text{ mW}$ , 且都完全进入芯层。其他参数为:  $L = 1 \text{ m}$ ,  $L_f = 18 \text{ mm}$ ,  $\xi = 1.5 \text{ dB}$ ,  $r_{s1} = 0.93$ ,  $r_{s2} = 0.9$ ,  $t_{s1,2} = \sqrt{1 - r_{s1,2}^2}$ ,  $n_o = 2.2113$ ,  $n_e = 2.1381$ ,  $\alpha(\nu_s) = 0$ ,  $N_0 = 2.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $\nu_p = 3.061 \times 10^{14} \text{ Hz}$  ( $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ ),  $\nu_s = 1.935 \times 10^{14} \text{ Hz}$  ( $\lambda_s = 1550 \text{ nm}$ )。另外, 由文献[8]得到下列数据:  $\tau = 11.4 \text{ ms}$ ,  $\sigma_{ab}(\nu_p) = 3.8 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{ab}(\nu_s) = 3.1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_{em}(\nu_s) = 2.7 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ 。

当加在 AOTF 上的声波频率为  $175 \text{ MHz}$  时, 在中心波长  $1550 \text{ nm}$  处, 可得到放大的激发光输出, 如图 3 所示。图中横坐标为输出波长, 纵坐标为激发光输出功率与初始时刻由自发辐射产生的小信号光功率的比值。最大约为  $40.19 \text{ dB}$ , 峰值线的半极大值宽度约为  $0.2626 \text{ nm}$ 。

调谐加在 AOTF 上的声波的频率, 可以使激光器输出峰值的波长呈线性改变, 而且调谐范围在理论上只受掺铒光纤增益和滤波器带宽的限制。如图 4 所示, 随着加在 AOTF 上的声波频率的增大, 激光器输出峰值的波长线性地减小。从图中能看出, 在中心波长  $1550 \text{ nm}$  附近, 声波频率每变化  $1 \text{ MHz}$ , 激光器调谐输出的峰值波长间隔约为  $8.9524 \text{ nm}$ 。由于集成光学 AOTF 的调谐范围很大 ( $\sim 20 \text{ MHz}$ ), 因

此, 所得到的光纤激光器的输出调谐范围也是相当大的。

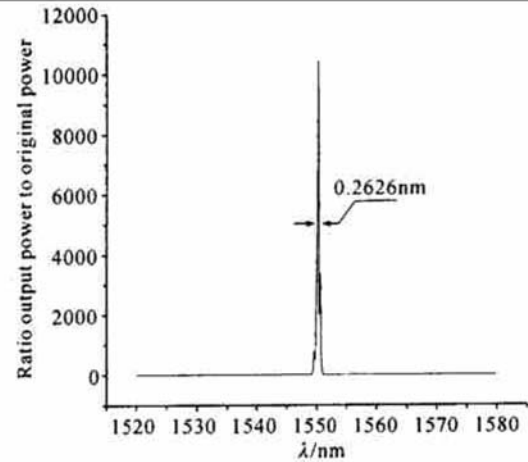


图 3 光纤激光器的窄线宽输出

Fig. 3 Narrow-linewidth output of the fiber laser

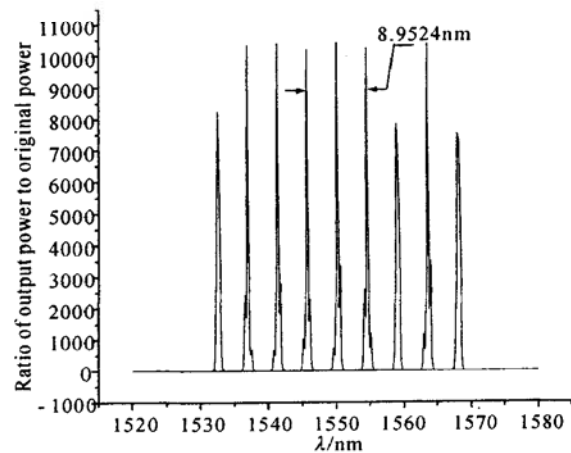


图 4 光纤激光器的调谐特性

Fig. 4 Tunable characteristic of the fiber laser

利用所给的参数计算, 能够得到此激光器的阈值抽运功率为  $0.795 \text{ mW}$ , 斜率效率为  $15.15\%$ 。这表明此激光器有较低的阈值抽运功率和较高的斜率效率。

按上述的光束传播法, 只需往返计算  $8$  次左右, 就能得到较为稳定的激发光输出, 亦即在很短的时间内就能得到相当好的正确结果, 其效率比常用的 FFT-BPM 计算方法有成百倍的提高。

由于此光纤激光器的纵模间隔  $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n(L + 2L_f)}$ , 为  $10^{-13} \text{ m}$  量级, 而我们所用的两级 AOTF 的滤出带宽远大于此数量级 (见图 5), 要使此光纤激光器实现单纵模输出, 还需要对其进行优化和改进设计, 比如附加一段可饱和吸收光纤用来跟

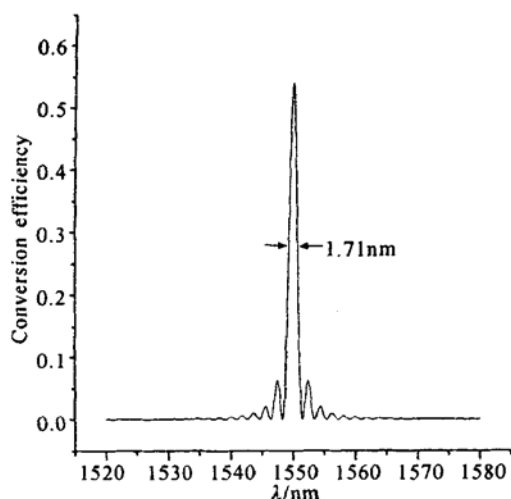


图5 两级声光可调谐滤波器的转换效率

Fig. 5 Conversion efficiency of the two stages AOTF

踪细调和稳定单纵模输出。

## 4 结 论

利用 AOTF 的声光可调谐光纤激光器的方案, 具有调谐范围大, 调谐方便的优点。计算结果表明, 通过改变声波的频率可以线性地调谐输出激光的峰值波长, 在中心波长 1550 nm 附近, 声波频率每变化 1 MHz, 激光器的输出波长就改变了 8.95 nm 左右。并且此激光器输出峰值的线宽很窄, 峰值线的半极大值线宽约为 0.26 nm。

但是, 输出激光的线宽还远大于纵模间隔, 对于要求单纵模运用的情形, 还需要对此激光器进行改进设计, 如附加可饱和吸收光纤等细调元件或采用复合谐振腔等。

## 参 考 文 献

- 1 Nie Qihua. Technology of Fiber Laser and Amplifier [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997 (in Chinese)
- 2 Hu Zhaoyang, Li Fuying, Pan Zhenwu *et al.*. Wavelength-tunable narrow-linewidth semiconductor fiber-ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(8): 977~ 979
- 3 Xue Ting, Qi Fang, Hu Hongzhang *et al.*. Development of integrated optical acoustooptic tunable wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(8): 1095~ 1099 (in Chinese)
- 4 Hu Hongzhang, Ling Shide. Theory of Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1993 (in Chinese)
- 5 Ching-Ting Lee, Lih-Gen Sheu. Analysis of end-pumped Nd: Ti: LiNbO<sub>3</sub> microchip waveguide Fabry-Perot lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(11): 2147~ 2153
- 6 Chih-hung Huang, Leon McCaughan, Douglas M. Gill. Evaluation of absorption and emission cross sections of Er-doped LiNbO<sub>3</sub> for application to integrated optic amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(5): 803~ 809
- 7 Eric Lallier, J. P. Pocholle, M. Papuchon *et al.*. Nd: MgO: LiNbO<sub>3</sub> channel waveguide laser devices [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(3): 618~ 625
- 8 Bo Pederson, Andrs Bjarklev, Ole Lumholt *et al.*. Detailed design of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(6): 548~ 550