

文章编号: 0258-7025(2006)07-0877-05

# 基于新型两级集成光学声光可调谐滤波器的 环形腔掺铒光纤激光器

郭 巍<sup>1</sup>, 刘 迎<sup>1</sup>, 肖立峰<sup>1</sup>, 耿 凡<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学理学院应用物理系光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)  
<sup>2</sup> 天津津航技术物理研究所, 天津 300192)

**摘要** 设计了一种以新型两级集成光学声光可调谐滤波器(IAOTF)为调谐元件的环形腔单偏振输出可调谐掺铒光纤激光器,它具有结构简单、调谐方便、调谐速度快和调谐范围大的优点。在对该集成光学声光可调谐滤波器滤波特性进行分析的基础上,在忽略放大的自发辐射(ASE)和激发态吸收情况下,对该激光器的特性参量如线宽、输出功率、斜率效率、阈值抽运功率等进行了分析。当抽运功率为100 mW,射频为175 MHz时,激光器输出中心波长为1550 nm,最大输出功率约6.34 mW,斜率效率为7.19%,半峰全宽(FWHM)为0.1 nm。当声波频率每改变0.1 MHz时,激光器输出中心波长改变约为0.88 nm,由于集成光学声光可调谐滤波器的滤波范围很大(当声波频率变化20 MHz时,滤波范围为180 nm),所以激光器的调谐范围仅取决于掺铒光纤的增益带宽。

**关键词** 激光技术;集成光学;掺铒光纤激光器;声光可调谐滤波器

**中图分类号** TN 248;TN 256 **文献标识码** A

## Study on Characteristics of Acoustooptical Tunable Erbium-doped Fiber Ring Laser

GUO Wei<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, XIAO Li-feng<sup>1</sup>, GENG Fan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, Ministry of Education,  
Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup> Tianjin Jinhang Institute of Technology Physics, Tianjin 300192, China)

**Abstract** A new-style single mode output tunable erbium-doped fiber ring laser employing advanced two-stage integrated acousto-optic tunable filter (IAOTF) is presented. It has simple structure and can be tuned conveniently, widely and rapidly by changing the acoustic frequency. Considering the conversion efficiency of this IAOTF and neglecting amplified spontaneous emission (ASE) and excited-state absorption (ESA), the characteristics of the laser such as line width, output power, slope efficiency, and threshold power are discussed. When pumping power is 100 mW and radio frequency (RF) is 175 MHz, the center wavelength of the laser is 1550 nm, output power peak is about 6.34 mW, slope efficiency is 7.19%, and output peak with a full width at half maximum (FWHM) of 0.1 nm is obtained, the tuned peak gap is about 0.88 nm when changed the acoustic frequency by 0.1 MHz. Because the tunable range of the IAOTF is wide (about 180 nm when acoustic frequency changes in 20 MHz), the tunable range of the laser is only decided by the gain bandwidth of the erbium-doped fiber.

**Key words** laser technique; integrated optics; erbium-doped fiber laser; acousto-optic tunable filter

收稿日期:2005-05-31;收到修改稿日期:2005-11-07

基金项目:国家自然科学基金(60478036)资助项目。

作者简介:郭 巍(1981—),女,吉林松原人,天津大学理学院应用物理系 03 级光学专业硕士研究生,现主要从事集成光电子学和光纤激光器研究。E-mail:guowei10221022@yahoo.com.cn

导师简介:刘 迎(1956—),男,天津人,天津大学理学院应用物理系教授,博士生导师,主要从事集成光电子学与生物医学的研究。E-mail:liuying56@163.com



$\kappa$  为声光耦合系数,  $L_I$  为声光相互作用长度,  $\Delta\beta = 2\pi\left(\frac{\Delta n}{\lambda} - \frac{f_a}{V_a}\right)$ 。适当调整声波强度, 使得  $\kappa L = \pi/2$ 。在满足相位匹配条件, 即  $\Delta\beta = 0$  时,  $\rho = 1$ , 达到最大值, 如果波长偏离相位匹配条件,  $\rho$  下降, 从而达到滤波的目的。两级集成光学声光可调谐滤波器有以下参数:  $L_I = 25 \text{ mm}$ ,  $V_a = 3752 \text{ m/s}$ ,  $n_{TE} = 2.2125$ ,  $n_{TM} = 2.1383$ , 得到的滤波特性如图 2 所示,  $-3 \text{ dB}$  带宽为  $0.71 \text{ nm}$ 。

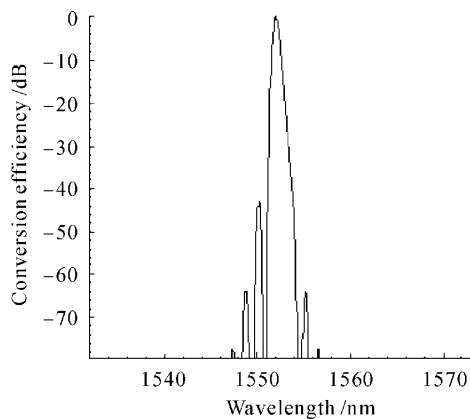


图 2 两级集成光学声光可调谐滤波器转换效率(理论)  
Fig. 2 Conversion efficiency of the two-stage IAOTF (theory)

### 2.2.2 实验测量

使用该器件时, 在  $AC$  段和  $BD$  段之间需要连接一段光纤和偏振控制器, 所以不容易测量整个器件的滤波特性, 但因为  $AC$  段和  $BD$  段结构和工艺参数完全一样, 只需测量其中一段的转换效率, 就可以得出整个器件的转换效率。测量结果(用自行设计的数据采集系统)如图 3 所示, 最大侧瓣  $-13.2 \text{ dB}$ ,  $-3 \text{ dB}$  带宽为  $1.1 \text{ nm}$ , 所以两级集成光学声光可调

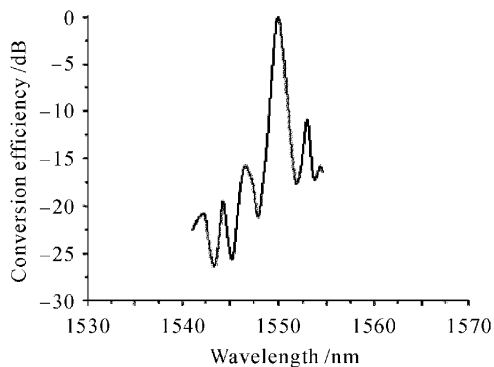


图 3 实验测得的  $AC$  段集成光学声光可调谐滤波器转换效率

Fig. 3 Conversion efficiency of the IAOTF of AC part (experiment)

谐滤波器  $-3 \text{ dB}$  带宽为  $0.78 \text{ nm}$ , 与理论结果稍有差异。分析引起差异的主要原因有: 1) 光波导的不均匀性: 声表面波的激发和吸收所产生的光波导温度梯度, 晶体材料的不均匀性, 制作过程中产生的不均匀性; 2) 理论模型的近似性; 3) 数据采集系统的误差。

由于光纤和波导的耦合还不尽完善, 实际测得  $AC$  段插入损耗为  $4 \text{ dB}$ , 所以两级集成光学声光可调谐滤波器插入损耗为  $8 \text{ dB}$ , 今后可以通过改变光波导或光纤截面形状及大小, 以改变模场分布或数值孔径, 从而提高二者的耦合效率。

## 3 环形腔声光可调谐掺铒光纤激光器

以两级集成光学声光可调谐滤波器为调谐元件的环形腔可调谐掺铒光纤激光器结构如图 4 所示。980 nm 激光二极管抽运光经波分复用耦合器耦合入掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤(增益介质), 在光纤中形成粒子数反转, 由于  $\text{Er}^{3+}$  自发辐射激起  $1550 \text{ nm}$  波长附近的信号光, 经过输出耦合器一部分作为激光输出, 另一部分作为信号光, 经两级集成光学声光可调谐滤波器的滤波和腔内器件的衰减后再次进入掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大, 只要其增益与循环一周的衰减相等, 就能够实现稳定激光输出。隔离器的作用是保证激光在单一方向传输。下面应用较为简洁的激光器结构(如图 5 所示), 在考虑腔内损耗(包括集成光学声光可调谐滤波器转换效率、器件插入损耗)情况下, 获得了

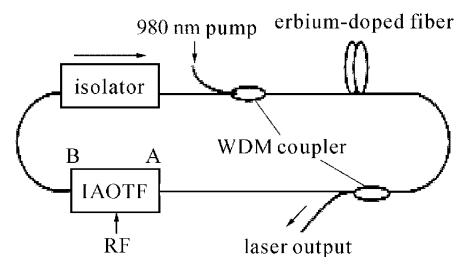


图 4 环形腔可调谐掺铒光纤激光器基本结构  
Fig. 4 Structure of tunable erbium-doped fiber ring laser

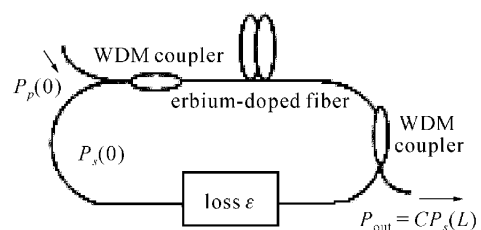


图 5 简化结构示意图  
Fig. 5 Simple structure

该环形掺铒光纤激光器主要特性参量(包括阈值抽运功率、输出功率,斜率效率)的解析表达式。

在 980 nm 激光二极管抽运下,设抽运光和信号光沿  $z$  方向传播(考虑同向抽运),忽略掺铒光纤的损耗,在稳态条件下,根据掺铒光纤放大器的速率方程和传输方程,经推导可得

$$\frac{\ln \frac{P_p(L)}{P_p(0)} + \sigma_{ap} \Gamma_p N_0 L}{\Gamma_p \sigma_{ap}} = \frac{\ln \frac{P_s(L)}{P_s(0)} + \sigma_{as} \Gamma_s N_0 L}{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})} = -\frac{\tau}{Ah\nu_p} [P_p(L) - P_p(0)] - \frac{\tau}{Ah\nu_s} [P_s(L) - P_s(0)], \quad (5)$$

式中  $L$  为掺铒光纤的长度,  $P_p(0)$ ,  $P_s(0)$ ,  $P_p(L)$ ,  $P_s(L)$  分别代表掺铒光纤两端输入和输出的抽运光和信号光的功率,  $h\nu_p$ ,  $h\nu_s$  分别表示抽运光和信号光的光子能量,  $\sigma_{ap}$ ,  $\sigma_{as}$  代表基态对抽运光和信号光的吸收截面,  $\sigma_{es}$  为激发态的受激辐射截面,  $\tau$  为亚稳态

到基态的弛豫时间,  $A$  表示纤芯掺铒有效面积,  $N_0$  为掺铒浓度.  $\Gamma$  为光波模场与  $\text{Er}^{3+}$  掺杂分布之间的重合积分,其定义为  $\Gamma_{p,s} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^a f_{p,s}(r, \phi) r dr$ , 其中  $a$  为铒光纤中  $\text{Er}^{3+}$  离子的掺杂半径,  $f_{p,s}(r, \phi)$  为归一化的场横向分布函数,满足  $\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\infty f_{p,s}(r, \phi) r dr = 1$ 。

激光器谐振腔总损耗  $\epsilon_t = \gamma\epsilon$ ,  $\gamma$  为波分复用耦合器的耦合损耗,  $\epsilon$  为腔内部损耗,  $\epsilon = \delta^{-2} \cdot \chi$ , 其中  $\delta$  为单级集成光学声光可调谐滤波器的模转换效率, 满足<sup>[5]</sup>  $\delta = (\kappa L_f)^2 \frac{\sin^2 \theta}{\theta^2}$ , 其中  $\kappa L_f = \frac{\pi}{2}$ ,  $\theta = \left[ (\kappa L_f)^2 + \left( \frac{\Delta \beta L_f}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$ .  $\chi$  为其他所有器件的插入损耗之和。

环形腔激光器稳定振荡的条件是增益应等于总损耗, 综上可得激光器的输出功率

$$P_{\text{out}} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} P_s(L) = \frac{\epsilon(\gamma - 1)}{\gamma\epsilon - 1} \frac{\nu_s}{\nu_p} \left\{ 1 - \frac{[\ln(\gamma\epsilon) + \Gamma_s \sigma_{as} N_0 L] Ah\nu_p}{\tau P_p(0) \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})} - (\gamma\epsilon)^\beta \exp(-\beta \Gamma_s \sigma_{es} N_0 L) \right\} P_p(0),$$

$$\beta = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap}}{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})}, \quad (6)$$

由  $P_{\text{out}} = 0$ , 可推得阈值抽运功率为

$$P_p^{\text{th}}(0) = \frac{[\ln(\gamma\epsilon) + \Gamma_s \sigma_{as} N_0 L] Ah\nu_p}{\tau \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es}) [1 - (\gamma\epsilon)^\beta \exp(-\beta \Gamma_s \sigma_{es} N_0 L)]}, \quad (7)$$

由(6)式可得斜率效率为

$$\eta = \frac{dP_{\text{out}}}{dP_p(0)} = \frac{(\gamma - 1)\epsilon}{\gamma\epsilon - 1} \frac{\nu_s}{\nu_p} [1 - (\gamma\epsilon)^\beta \exp(-\beta \Gamma_s \sigma_{es} N_0 L)], \quad (8)$$

在给定抽运功率  $P_p(0)$  的情况下, 可得掺铒光纤的最佳长度. 令  $dP_{\text{out}}/dL = 0$ , 得

$$L_{\text{opt}} = \frac{1}{\beta \Gamma_s \sigma_{es} N_0} \ln \left[ \frac{\tau P_p(0) \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es}) (\gamma\epsilon)^\beta \beta \sigma_{es}}{\sigma_{as} Ah\nu_p} \right]. \quad (9)$$

理想情况下, 激光器中心波长满足相位匹配条件,  $\Delta\beta = 0$ , 所以  $\delta = 1$ , 插入损耗  $\epsilon = \chi = 8$  dB(其他损耗忽略)。数值模拟所采用的参量为:  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J·s,  $\nu_p = 3.061 \times 10^{14}$  Hz ( $\lambda_p = 980$  nm),  $\nu_s = 1.935 \times 10^{14}$  Hz ( $\lambda_s = 1550$  nm); 单模掺铒光纤的参量由天津中国电子科技集团公司提供:  $a = 2.2$   $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.17$ ,  $N_0 = 3.5 \times 10^{24}$   $\text{m}^{-3}$ ,  $\tau = 10.2$  ms,  $\sigma_{ap}(980) = 1.7 \times 10^{-25}$   $\text{m}^{-3}$ ,  $\sigma_{as}(1550) = 2.3 \times 10^{-25}$   $\text{m}^{-3}$ ,  $\sigma_{es}(1550) = 3.1 \times 10^{-25}$   $\text{m}^{-3}$ ; 输出耦合器的输出耦合比  $C = 10\%$ , 即  $\gamma = 1.11$ 。对于单模传输, 信号光和抽运光的光场分布函数可用高斯波形来表示, 即  $f_{p,s}(r, \phi) = \frac{1}{\pi w_{p,s}^2} \exp\left(-\frac{r^2}{w_{p,s}^2}\right)$ , 其

中  $w_{p,s}$  ( $p, s$  分别代表抽运光和信号光) 为模场半径, 对于阶跃分布的折射率, 有  $w_{p,s} = a(2 \ln V_{p,s})^{-1/2}$ , 其中  $V_{p,s} = \frac{2\pi}{\lambda_{p,s}} a NA$ ,  $V_{p,s}$  为光纤的归一化频率. 因此光波模场与  $\text{Er}^{3+}$  掺杂分布之间的重合积分  $\Gamma$  可以表示为

$$\Gamma_{p,s} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^a f_{p,s}(r, \phi) r dr = 1 - V_{p,s}^{-2}, \quad (10)$$

代入参量计算可得:  $\Gamma_p = 0.826$ ,  $\Gamma_s = 0.565$ , 所以  $\beta = 0.46$ 。

设由自发辐射产生的初始小信号功率为  $0.1$   $\mu\text{W}$ , 抽运光功率为  $100$  mW, 由(9)式得最佳掺铒光纤长度为  $17.85$  m, 由(7)和(8)式得到抽运阈值功率为  $10.13$  mW, 斜率效率为  $7.19\%$ 。当射频为

175 MHz时,数值模拟得到的激光输出如图 6 所示,激光中心波长为1550 nm,输出功率为6.46 mW,带宽约为0.1 nm。通过改变加在集成光学声光可调谐滤波器上的声波频率,可以使激光器输出中心波长呈线性变化,理论计算在中心波长1550 nm附近,声波频率每变化0.1 MHz,激光中心波长间隔约为0.88 nm,调谐范围理论上只受掺铒光纤增益和滤波器带宽的限制,由于集成光学声光可调谐滤波器的调谐范围很大,即声波频率变化20 MHz时,滤波带宽约为180 nm,所以光纤激光器的调谐范围仅取决于掺铒光纤的增益带宽。

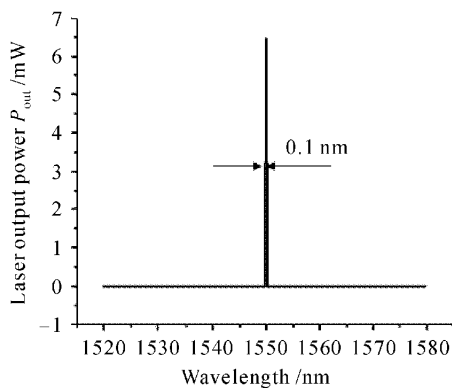


图 6 光纤激光器的窄线宽输出

Fig. 6 Narrow line width output of the fiber laser

## 4 结 论

对以新型两级准共线集成光学声光可调谐滤波器为调谐元件的环形腔可调谐掺铒光纤激光器的特性参量如线宽、输出功率、斜率效率、阈值抽运功率等进行了分析。当抽运功率为100 mW,射频为175 MHz时,激光器输出中心波长1550 nm,最大输出功率约6.34 mW,斜率效率为7.19%,激光输出半峰全宽约为0.1 nm,声波频率每变化0.1 MHz,激光中心波长改变约0.88 nm,调谐范围只取决于掺铒光纤的增益带宽。作为调谐元件的集成光学声光可调谐滤波器,只用一个声波导和射频驱动,结构简单、调谐范围大,调谐速度快,调谐方便,大大提高了激光器的性能。但也存在一些不足,如集成光学声光可调谐滤波器插入损耗较大,使激光器腔内损耗加大,消耗了更多的980 nm抽运光功率。

## 参 考 文 献

1 Feng Xinhuan, Sun Lei, Liu Yang et al.. Switchable and

spacing-tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using a PM fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 145~148

冯新焕,孙 磊,刘艳格等. 基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):145~148

2 Yang Shiquan, Zhao Chunliu, Meng Hongyun et al.. Wavelength tunable erbium-doped fiber ring laser operating in L-Band [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):677~679

杨石泉,赵春柳,蒙红云等. 工作在L波段的可调谐环形腔掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):677~679

3 Huang Dexiu, Shu Xuewen, Wen Tao et al.. Novel multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):313~316

黄德修,舒学文,文 韬等. 一种新颖的多波长环形腔掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):313~316

4 Zhao Donghui, Wei Zhenxing, Tang Tao et al.. Erbium-doped fiber ring laser with fiber Bragg grating and all fiber M-Z interferometer [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1999, **16**(4):321~323

赵东晖,魏振兴,唐 涛等. 利用光纤光栅和光纤M-Z干涉仪共同选频的环形掺铒光纤激光器[J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(4):321~323

5 Xue Ting, Qi Fang, Hu Hongzhang et al.. Development of integrated optical acoustooptic tunable wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8):1095~1099

薛 挺,祁 芳,胡鸿璋等. 集成光学声光可调谐波长滤波器的研制[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8):1095~1099

6 H. Z. Hu, H. Y. Lin, J. S. Yang et al.. An integrated quasi-collinear coupled acoustooptic mode converter [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**(1-3):79~83

洪宝玉,向望华,胡鸿璋等. 准共线声光可调谐掺铒光纤激光器的研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(5):460~464

8 Hu Bin, Hu Hongzhang, Lin Hangyou et al.. Study on characteristics of tunable fiber laser employing AOTF [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):5~8

胡 斌,胡鸿璋,林航友等. 利用AOTF的可调谐光纤激光器的特性研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):5~8

9 Hu Hongzhang, Ling Shide. Theory of Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1996. 187~189

胡鸿璋,凌世德. 应用光学原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1996. 187~189

10 L. Bersiner, U. Hempelmann, E. Strake. Numerical analysis of passive integrated optical polarization splitters; Comparison of finite-element method and beam-propagating method result [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(2):422~433

胡鸿璋,戴和义,赵 慈等. 共线声光耦合的集成光学TE/TM模转换器[J]. *光子学报*, 1997, **26**(4):340~344

11 Hu Hongzhang, Dai Heyi, Zhao Ci et al.. Integrated optical TE/TM mode converter based on collinear cousto-optic coupling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(4):340~344

胡鸿璋,戴和义,赵 慈等. 共线声光耦合的集成光学TE/TM模转换器[J]. *光子学报*, 1997, **26**(4):340~344

12 Hu Hongzhang, Zhang Mei, Xiao Lifeng. The characteristics analysis of an integrated optical acousto-optic tunable filter based on spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 21~24

胡鸿璋,张 梅,肖立峰. 集成光学声光可调谐光谱仪的特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):21~24