

声光可调谐环形腔掺铒光纤激光器^{*}

杨 薇¹⁾ 刘 迎¹⁾ 肖立峰^{1)†} 杨兆祥¹⁾ 潘建旋²⁾

1) (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)

2) (天津津航技术物理研究所, 天津 300192)

(2009 年 4 月 15 日收到; 2009 年 6 月 3 日收到修改稿)

应用单级偏振无关的准共线型声光可调谐滤波器为调谐元件, 实现了环形腔掺铒光纤激光器的连续可调谐激光输出. 简要阐述了与偏振无关的准共线型声光可调谐滤波器的工作原理, 对其频移补偿原理进行了分析. 实验研究得到: 当抽运功率为 13 mW 时, 中心波长为 1550 nm 的激光输出功率为 322 μ W, 阈值抽运功率在 7.65 mW 左右, 斜率效率约为 6.02%; 并获得了 38 nm 带宽 (1524.7—1562.4 nm) 的连续可调谐激光输出.

关键词: 集成光学, 掺铒光纤, 光纤激光器, 声光可调谐滤波器

PACC: 4260, 4282, 4281

1. 引 言

可调谐掺铒光纤激光器 (EDFL) 作为一种新型激光源, 是目前国际上的研究热点. EDFL 的激光波长处在光通信 1550 nm 波段, 与光纤通信系统完全兼容, 并且具有抽运效率高、兼容性好以及支持动态波长分配提高网络灵活性等优点, 在光通信系统、光纤传感、现代光谱技术等诸多领域有着重要的应用价值^[1-5].

实现可变波长输出需要在光学谐振腔中加入可调谐光滤波器. 常见的可调谐光滤波器有: 法布里-珀罗滤波器、马赫-曾德尔滤波器、电光滤波器、可调谐光纤光栅滤波器和声光可调谐滤波器 (AOTF) 等. 其中, AOTF 有其独特的优越性, 例如调谐速度快、调谐范围宽、滤波带宽窄、插入损耗低以及具有多态波分复用开关的功能等^[6-8].

AOTF 是一种以声光相互作用原理为基础的新型器件, 其滤波作用是基于光波导中 TE 模和 TM 模之间的模式转换. 由于模折射率不同, 模式转换时要吸收或释放一个光子, 导致光的频率上移或下移. Smith 等^[9] 利用两个单级共线型 AOTF 进行两级滤波, 经过 TE—TM—TE 两次模式转换消除了频

移, 实现了环形腔掺铒光纤激光器的连续可调谐激光输出. 但他们的 AOTF 是偏振依赖的, 因此需要接入偏振控制器, 这不仅加大了腔内损耗, 也降低了腔内光束的稳定性. 随着模分离器结构的提出, 人们设计出了与偏振无关的声光滤波器, 使得器件不再依赖于入射光的偏振状态^[10,11]. 其中 Hashimoto 等^[12] 将两个准共线型 AOTF 制作在同一个基片上, 并通过插入一个法布里-珀罗腔, 实现了可调谐激光输出.

上述两种方案都是利用两级 AOTF 消除频移从而实现激光输出的, 这样就增加了器件的工艺难度, 限制了其发展与应用. 2002 年我们实验室研制了偏振无关的准共线型 AOTF^[13]. 本文应用该单级的准共线型 AOTF 为调谐元件, 实现了环形腔掺铒光纤激光器的连续可调谐激光输出. 这种结构设计只利用单级的 AOTF 便实现了频移补偿, 获得了激光输出, 因此使器件的制作工艺更为简单、易于实现, 降低了成本. 实验中使用 980 nm 的半导体激光器做抽运源, 选用 10 m 普通掺铒光纤作为增益介质, 实验测得: 当抽运功率为 13 mW 时, 中心波长为 1550 nm 的激光输出功率为 322 μ W, 阈值抽运功率在 7.65 mW 左右, 斜率效率约为 6.02%. 可调谐范围达 38 nm (1524.7—1562.4 nm).

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 60478036) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xiaolifeng79@126.com

2. 准共线型 AOTF 的结构及其滤波原理

偏振无关的单级准共线型 AOTF 的基本结构如图 1 所示. 它由两个模分离器(使得器件不依赖于入射光的偏振状态)和两条沿 Y 轴平行的光波导组成. 光波导由 Ti 扩散形成; 声波导采用 SiO₂/In₂O₃ 薄膜制成, 且与光波导成一个微小的夹角 θ . 在图 1 中, 施加在叉指换能器 (IDT) 上的射频信号激发出声表面波 (SAW), SAW 的周期性扰动, 使得满足位

相匹配条件的光波实现 TE 模和 TM 模的相互转换. 位相匹配条件为

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n - K_{ac} = 0,$$

(1)

式中 λ 为自由空间的光波长, Δn 为 TE, TM 模的有效折射率差, 声波波数 K_{ac} 是声波矢在 Y 轴上的投影. 根据制作光波导时所选用 Ti 扩散的条件参数及 SiO₂/In₂O₃ 薄膜的厚度和折射率, 便可得到 Δn ; $K_{ac} \approx 2\pi f_{ac}/v_{eff,m}$, 其中 f_{ac} 是声表面波的频率, 声表面波的 m 阶模的有效传播速度 $v_{eff,m}$ 可以通过求解声波导的标量波动方程得到^[13].

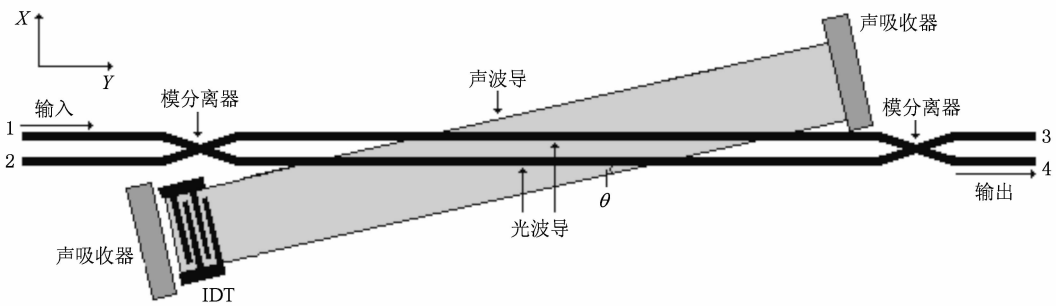


图 1 偏振无关的准共线型 AOTF 的结构

在图 1 所示的结构中, 声波与光波传播方向一致, 欲使 TE 模转换为 TM 模, TE 光子必须吸收一个声子, 获得能量, 引起信号光的频率上移; 欲使 TM 模在相同方向上转换为 TE 模需要释放一个声子, 导致信号光的频率下移. 如图 2 所示: 光从端口 1 输入, 在第一个模分离器处, TE, TM 模分离 (TE 模直通, TM 模叉通). 满足位相匹配条件的光 (频率为 f), 其 TE(f), TM(f) 模在通过模转换器后, 发生模式转换, TE(f) 转换成为 TM($f+f_{ac}$), TM(f) 转换成为 TE($f-f_{ac}$); 转换后的两种模式在第二个模分离器处合成为一束光, 从端口 4 输出, 而不满足位相

匹配条件的光, 未发生模式转换, 从端口 3 输出, 从而实现了所需波长的光与其他光波的分离. 可见, 满足位相匹配条件的光在第一次通过模转换器之后, 变成两个频率, 其频率间隔为 $2f_{ac}$. 在环形激光腔结构中, 从端口 4 输出的两种模式 TM($f+f_{ac}$), TE($f-f_{ac}$), 在腔内运行一周后, 仍从端口 1 输入并在第一个模分离器处分离, 在通过模转换器后, 再次发生模式转换, TM($f+f_{ac}$) 转换成为 TE(f), TE($f-f_{ac}$) 转换成为 TM(f); 第二次转换后的两种模式在第二个模分离器处合成为一束光, 最后从端口 4 输出. 可以看出, 光波在发生第二次模式转换后, 频

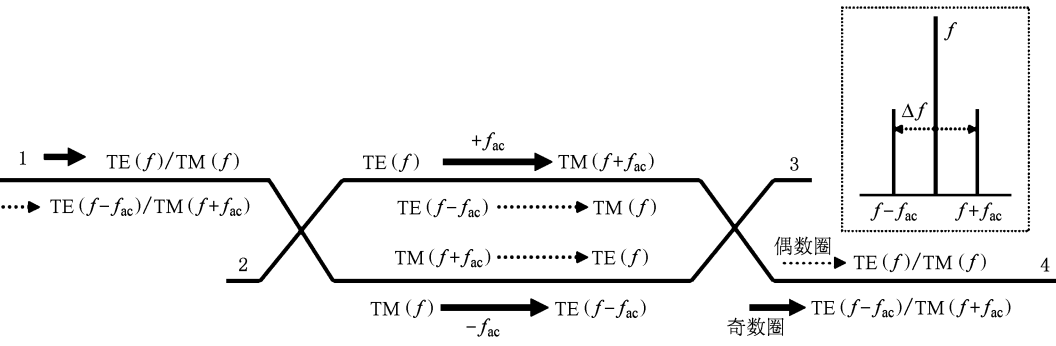


图 2 TE/TM 偏振模式转换示意图 内插图为环形腔输出含有三个频率的光波图

率恢复为初始的 f . 从而可知,当光波在腔内运行奇数圈时,由于存在频移,光波两种模式的频率分别为 $(f-f_{ac})$ 和 $(f+f_{ac})$;当光波在腔内运行偶数圈时,频移得到补偿,光波两种模式的频率均为 f . 因此,环形腔输出的光波含有三个频率,分别为 $(f-f_{ac})$, f 和 $(f+f_{ac})$,频移所形成的频率间隔 $\Delta f=2f_{ac}$ (如图2中内插图所示).

3. 激光器结构设计

图3为声光可调谐环形EDFL的结构图,包括980 nm的抽运源、980 nm/1550 nm波分复用器(WDM)、增益介质掺铒光纤(EDF)、隔离器(ISO)、准共线型AOTF和输出耦合器. 980 nm的抽运光经过980 nm/1550 nm WDM的980 nm端口耦合进EDF并对其进行抽运. 光波通过ISO后进入AOTF进行波长选择,符合位相匹配条件的光发生模式转换,再进入9:1的输出耦合器,耦合器10%输出端提供激光输出,90%输出端提供反馈经980 nm/1550 nm WDM的1550 nm端口重新耦合进EDF,从而完成腔内的一次循环.

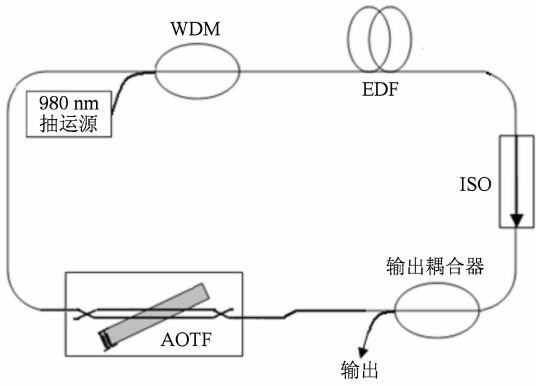


图3 声光可调谐环形腔掺铒光纤激光器

抽运源使用LDM9P617型980 nm半导体激光器,采用10 m普通掺铒光纤作为增益介质. 隔离器的隔离度大于50 dB,其作用是抑制放大幅射噪声(ASE),保证1550 nm激光在环形腔内的单向运行,提高系统稳定性. 实验中所用的滤波元件——准共线型AOTF的调谐范围为1490.5—1585.0 nm,而EDF在980 nm LD抽运下的荧光谱范围在1520—1560 nm,因此可以通过调节AOTF获得1520—1560 nm范围内任一波长位置的激光. 射频信号由Tektronix AFG3252(0—240 MHz)高频信号发生器

提供,经放大器放大后,加载在AOTF上. 利用AQ6317C(工作波长范围600—1750 nm,分辨率0.02 nm)光谱仪进行观察与测量.

4. 实验测定及结果分析

采用图3所示的环形腔结构,将抽运功率固定于8 mW,改变施加在AOTF上的射频频率,得到输出激光的中心波长随射频频率的变化关系(如图4所示). 调节射频频率在174.6—170.3 MHz范围,得到1524.7—1562.4 nm范围内的连续可调激光输出,调谐范围达38 nm. 从而可知,射频频率每改变0.1 MHz,中心波长改变约0.86 nm,具有良好的线性调谐特性. 输出激光的中心波长与其输出功率的对应关系如图5中空三角所示. 从图中可看出,最大输出功率为1531.86 nm处的-15.2 dBm,最小输出功率为1555.1 nm处的-20 dBm. 输出功率的不均匀,主要是由于AOTF的转换效率随波长变化,造成损耗的改变;而且腔内其他器件的插入损耗也具有不同程度的波长依赖性,这些均使得腔内总损耗发生改变. 另外,调谐过程中出现的模式竞争现象,也影响了输出功率的稳定性. 图5中实心圆点为输出激光的中心波长与其半高全宽(FWHM)的对应关系. 除个别波长外,输出激光在调谐范围内的FWHM均在0.04 nm以下,且具有较好的稳定性.

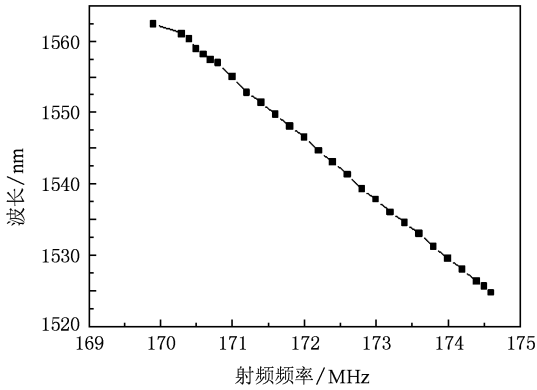


图4 输出激光波长与射频频率的关系

将射频频率固定于171.1 MHz,激射波长在1550 nm左右;然后调节抽运功率大小,从而实现了对激光功率的控制输出. 图6中空三角曲线给出了抽运功率与输出激光的边模抑制比(SMSR)的对应关系. 随着抽运光功率的升高,对ASE噪声抑制程

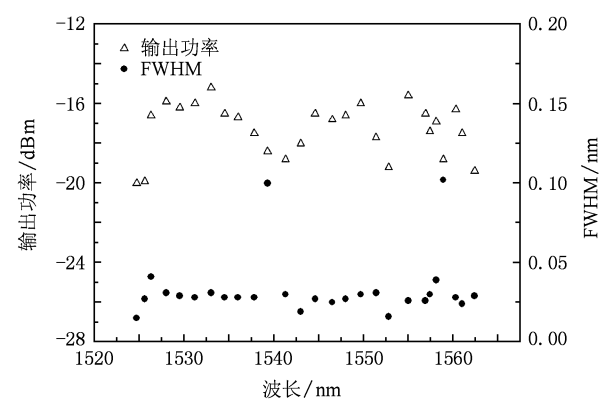


图5 激光输出功率、半高全宽(FWHM)与激光波长的关系

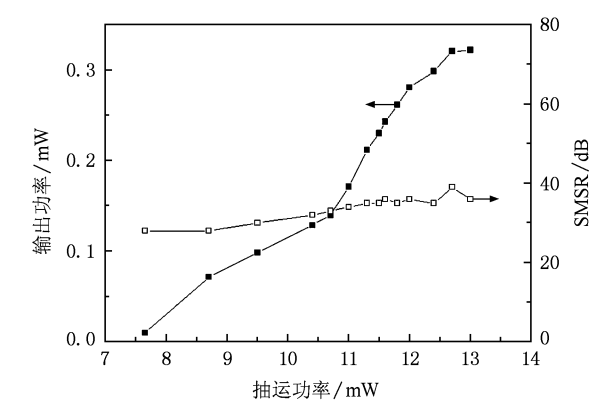


图6 激光器输出功率、边模抑制比(SMSR)与抽运功率的关系

度逐渐增强,使得激光的 SMSR 缓慢变大. SMSR 最大为 39 dB. 激光器的功率输出特性如图 6 中实心方形曲线所示,具有线性的输出特性. 当施加的抽运功率为 7.65 mW 时,开始观察到有激光输出;当抽运功率增至 13 mW 时,激光器输出功率为 322 μ W,其斜率效率约为 6.02%,此时的激光输出谱如图 7 所示. 由于提供的抽运功率较低,且损耗较大(腔内各器件的插入损耗、耦合输出损耗、抽运

吸收、光纤熔接损耗等),加之选择的输出耦合比较小(10% 输出端作为激光输出,90% 输出端提供反馈),上述原因都使得输出激光功率较低.

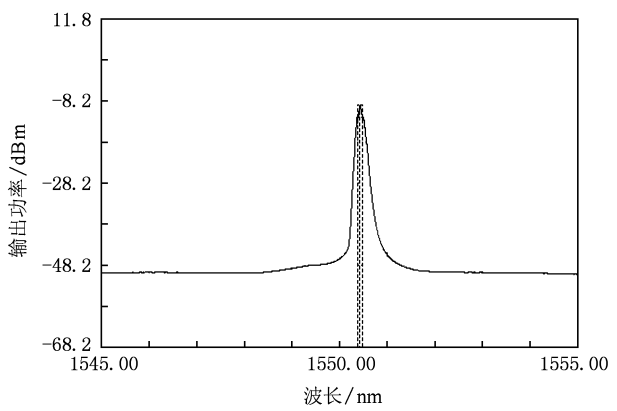


图7 声光可调谐环形腔 EDFA 的输出光谱

实验中,测得输出激光(除个别波长外)的 FWHM 在 0.04 nm 附近;而中心频率变化 $\Delta f = 2f_{ac} \approx 342.2$ MHz,大概为 0.002 nm(不仅小于激光的 FWHM,而且也小于光谱仪的分辨率). 可见,在图 3 所示的激光器结构中,由于声光效应所造成的光波频移影响是微乎其微的,可以不予考虑.

5. 结 论

本文提出了一种结构简单的环形腔 EDFA,该结构利用单级偏振无关的准共线型 AOTF 便实现了频移补偿,获得了激光输出,而且制作工艺简单、易于实现. 实验测得:当抽运功率为 13 mW 时,中心波长为 1550 nm 的激光输出功率为 322 μ W,阈值抽运功率在 7.65 mW 左右,斜率效率约为 6.02%;获得了 38 nm 带宽(1524.7—1562.4 nm)的连续可调谐激光输出.

[1] Zhao D H, Lai Y C, Shu X W, Zhang L, Bennion I 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4520

[2] Chen G J, Huang D X, Zhang X L, Cao H 2008 *Opt. Lett.* **33** 554

[3] Guo W G, Yang X F, Luo S J, Li Y N, Tu C H, Lü F Y, Wang H J, Li E B, Lü C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 308 (in Chinese) [郭文刚、杨秀峰、罗绍均、李勇男、涂成厚、吕福云、王宏杰、李恩邦、吕 超 2007 物理学报 **56** 308]

[4] Luo S J, Guo W G, Yang X F, Lü F Y, Lü C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1889 (in Chinese) [罗绍均、郭文刚、杨秀峰、吕福云、吕 超 2006 物理学报 **55** 1889]

[5] Fan W H, Tian X J, Yu Y L, Chen J F, Luo H E 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5105 (in Chinese) [范文华、田小建、于永力、陈菊芳、罗红娥 2006 物理学报 **55** 5105]

[6] Xiao L F, Liu Y, Wang W P, Geng F 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 645

- [7] Antonio D M, Mario S, Gianluca G, Pietro F, Paolo D N 2006 *Appl. Opt.* **45** 9176
- [8] Yang W, Liu Y, Xiao L F, Gao S L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 328 (in Chinese) [杨 薇、刘 迎、肖立峰、高树理 2009 物理学报 **58** 328]
- [9] Smith D A, Maeda M W, Johnson J J, Patel J S, Saifi M A, von Lehman A 1991 *Opt. Lett.* **16** 387
- [10] Tian F, Harizi C, Herrmann H 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 1192
- [11] Herremann H, Schafer K, Reimann V, Richen R, Rust V, Sohler W, Wehrmann F, Westenhofer S, Schmidt C 1998 *Photon. Technol. Lett.* **10** 120
- [12] Hashimoto N, Miyata H, Takasu Y, Han G, Uematsu T, Nakazawa T 2001 *Integrated Photonics Research* California, USA, June 9, 2001 paper ITuG41 (OSA)
- [13] Hu H Z, Lin H Y, Yang J S, Zhang M, Chen J, Geng F 2002 *Opt. Commun.* **208** 79

Acousto-optic wavelength-tunable erbium-doped fiber ring laser^{*}

Yang Wei¹⁾ Liu Ying¹⁾ Xiao Li-Feng^{1)†} Yang Zhao-Xiang¹⁾ Pan Jian-Xuan²⁾

1) (Key Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science of Ministry of Education, Department of Applied Physics, College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Institute of Tianjin Jinhang Technology Physics, Tianjin 300192, China)

(Received 15 April 2009; revised manuscript received 3 June 2009)

Abstract

A erbium-doped fiber ring laser, which utilizes a single-stage polarization-independent acousto-optic tunable filter by use of quasi-collinear coupling as the tuning component, is proposed and a continuously tunable lasing wavelength is realized. The filtering principle of the polarization-independent quasi-collinear filter is introduced briefly, and then the compensation of frequency-shift is analyzed. The experimental results are that the output power of the laser pumped at 13 mW is measured to be 322 μ W at a lasing wavelength of 1550 nm, the threshold pump power is 7.65 mW, and the slope efficiency is 6.02%; the tuning range of 38 nm, starting from 1524.7 nm ending at 1562.4 nm, is observed.

Keywords: integrated optics, erbium-doped fiber, fiber laser, acousto-optic tunable filters

PACC: 4260, 4282, 4281

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60478036).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaolifeng79@126.com