

文章编号: 0258-7025(2004)12-1421-04

利用 M-Z 干涉仪和复合腔共同选频的 多波长光纤激光器

邱怡申, 林海峰, 李登峰

(福建师范大学物理与光电信息科技学院, 福建 福州 350007)

摘要 报道了一种新颖的多波长掺铒光纤环形激光器, 这种激光器是利用 M-Z 光纤型干涉仪作为梳状滤波器, 并且与复合腔共同选频, 在常温下获得了稳定的三波长输出, 其间隔约为 0.8 nm, 线宽约 0.1 nm。这种装置无需将增益介质放在液氮中, 也不需要多个光栅选频或其他复杂而昂贵的器件, 具有结构简单, 易实现和成本低等优点。

关键词 光电子学; 掺铒光纤激光器; 多波长激光; M-Z 干涉仪; 复合腔

中图分类号 TN 248.1; TN 929.11 **文献标识码** A

Multi-Wavelength Fiber Laser Using M-Z Interferometer and Composite Cavity

QIU Yi-shen, LIN Hai-feng, LI Deng-feng

(School of Physics & Opto-Electronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract A novel multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser is presented. Mach-Zehnder (M-Z) interferometer is used as comb filter and with an interlevel and composite cavity to select the wavelengths. The stable three-wavelength outputs with 0.8-nm wavelength span and 0.1-nm linewidth are obtained at room temperature. Without cooling the gain medium in liquid nitrogen or using gratings and complex, expensive devices, this fiber laser has the advantages of being simple and easily attainable at a low cost.

Key words optoelectronics; erbium-doped fiber laser; multi-wavelength oscillation; M-Z interferometer; composite cavity

1 引 言

密集波分复用(DWDM)是实现光纤通信系统升级扩容最经济和最有效的途径, 目前基于密集波分的系统传输容量已超过 3 Tbit/s^[1]。在这种系统中, 多波长激光器能同时为多个波长信道提供需要的光源, 使光端机的设计更紧凑、经济, 因此在波分复用系统中有重要的用途, 得到了广泛的研究。

由于掺铒光纤(EDF)在 1.55 μm 波段具有宽带宽、能和光纤系统兼容的优点, 如果采取适当的方法, 可以在单一介质中实现多波长同时输出, 因此引起了人们的极大兴趣。常温下, 掺铒光纤的均匀展宽特性, 例如高掺杂的掺铒光纤的均匀线宽在 1535

nm 处约 10.5 nm, 导致了模式竞争, 从而很难实现多波长同时激射。如果把掺铒光纤浸入液氮, 均匀线宽减小至 1 nm, 可实现多波长输出的掺铒光纤环形激光器^[2,3], 但是这种装置不适合实际应用。综述近几年文献报道的研究结果, 按照实现多波长的机制, 光纤激光器主要可分为三种类型: 第一种类型是利用多波长反馈^[4,5], 例如用多个光纤光栅选择波长实现多波长振荡, 缺点是需要多对不同布拉格波长的光栅来构成谐振腔, 成本高; 第二种类型是利用滤波方法, 例如可在腔中放置梳状滤波器或波导路由器^[6,7]; 第三种是利用不同增益介质实现多波长输出^[8], 但是如果增加波长数, 结构就变得非常复杂且效率低。此外, 还有一些其他方法, 如

收稿日期: 2003-04-30; 收到修改稿日期: 2003-12-23

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目。

作者简介: 邱怡申(1954—), 男, 福建师范大学物理与光电信息科技学院教授, 从事导波光学和光纤器件的研究。E-mail: ysqiu@fjnu.edu.cn

Graydon 等利用双芯掺铒光纤的空间烧孔效应获得了三波长的激光输出^[9]。Seung 等利用声光频移(AOFS)和增益平坦滤波器(GFF)实现了多波长输出^[10]。这些器件虽然可以在常温下工作,但是制作难度大,结构复杂且成本高。

我们研究了一种实现多波长输出的简易方法,即利用 M-Z 干涉仪和复合腔共同选模,在常温下获得了稳定的三波长输出。

2 多波长激光器原理

掺铒光纤的增益谱较宽,为了获得线宽窄的多波长激光输出,必须在腔内加入适当的波长选择装置。有多种方法可以实现波长选择,其中基于全光纤的 M-Z 干涉仪具有插入损耗小和多波长梳状滤波特性,它通常是由两个 3 dB 耦合器连接而成的。其归一化的输出光强可表示为^[11]

$$I = \sin^2 \frac{\pi n_{\text{eff}} \cdot \Delta l}{\lambda} \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤的有效折射率, Δl 为干涉仪两臂的臂长差, λ 为工作波长。不同波长对应着不同的输出功率,当 $\frac{\pi n_{\text{eff}} \cdot \Delta l}{\lambda} = (k\pi + \frac{1}{2}\pi)$ 时,输出功率达到最大值,两相邻最大值的波长差为

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{n_{\text{eff}} \cdot \Delta l} \quad (2)$$

由(2)式可知,光纤 M-Z 干涉仪是一种梳状滤波器,插入到光纤环中,可以对多个波长进行选择,而且在相干长度内改变干涉仪两臂的臂长差,就可以很容易地改变相邻最大值的波长差。

此外,利用复合腔结构也可以进行选频,由长度 l_1 和 l_2 的两光纤环通过耦合器连接起来形成了复合腔,只有同时满足两个腔的振荡条件时才有激光输出。根据游标效应,能够产生波长激射条件的模间距为^[12]

$$\Delta\nu = \frac{c}{n(l_1 - l_2)} \quad (3)$$

由(3)式可知,要获得尽可能大的有效自由光谱区的方法有两种,一种是使两个腔的长度非常接近,从而增大激光的模式间距;另一种方法是使其中的一个腔的长度远小于另一个腔,即 $l_2 \ll l_1$, 在这种结构中短腔起选模作用,相当于一个滤波器。

3 实验结果与讨论

采用第二种选频方法,建立了如图 1 所示的实

验装置。其中主腔是由 980 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)、掺铒光纤、隔离器(ISO)、梳状滤波器等组成的。隔离器的插入损耗为 0.2 dB,隔离度为 39.2 dB。掺铒光纤对 979 nm 抽运光和 1531 nm 信号光的吸收系数分别为 4.7 dB/m 和 5.7 dB/m,数值孔径为 0.23,截止波长为 905 nm。抽运源为中心波长 974.5 nm,最大输出功率 100 mW 的单模半导体激光器(LD),采用反向抽运的激光输出功率比正向抽运时高约 1.8 dB^[13]。为了使腔内激光单向运行,避免驻波引起的空间烧孔形成的多模振荡,在腔内插入了隔离器,而且隔离器还起到阻止输出信号的回波返回腔内的作用,从而提高了输出功率的稳定性。整个主腔的长度约为 18 m,子腔的长度约为 13 cm,通过耦合器 C_1 与主腔构成了复合腔, C_2 和 C_3 均为 3 dB 耦合器。

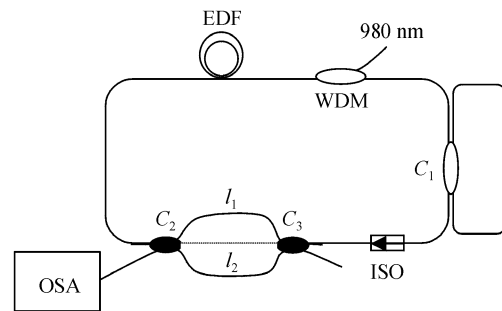


图 1 多波长掺铒光纤环形激光器实验装置示意图
Fig. 1 Multi-wavelength Er-doped fiber laser using M-Z interferometer and composite cavity

掺铒光纤长度以及 C_1 的耦合比 R_1 的选取应使输出功率最大。为此,首先测量了输出功率随 R_1 的变化规律,结果如图 2 所示。主腔内的信号一部分耦合进入子腔,形成复合腔,相当于腔的损耗。耦合比越大,进入子腔的信号越大,即损耗越大,但是从子腔返回到主腔的信号也越多,反之亦然。因此存在一最佳耦合比,从图 2 可以看出最佳耦合比 R_1 为 1:1。

其次,测量了在给定抽运功率和最佳耦合比 R_1 的条件下,激光的输出功率随掺铒光纤长度的变化规律,在未接 M-Z 干涉仪时实验结果如图 3 所示。从图中可知,存在一最佳值为 11.6 m,这是因为当抽运光沿光纤传输时,将因受激吸收而不断衰减,导致反转粒子数减少,当光纤长度超过一定值后,由于抽运功率不足而吸收信号光,导致增益下降。因此存在一最佳长度,且最佳长度并不是一固定值,它与输入抽运功率、铒离子浓度及其分布等因素有关。

实验中,掺铒光纤长度采用 11.6 m,连接主腔

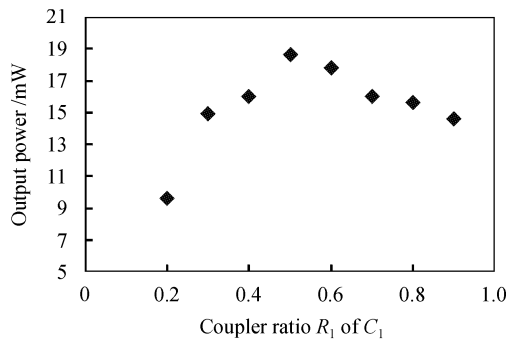
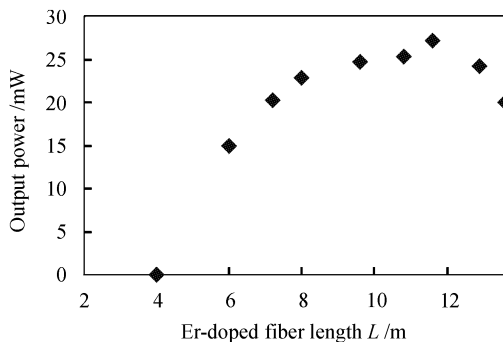
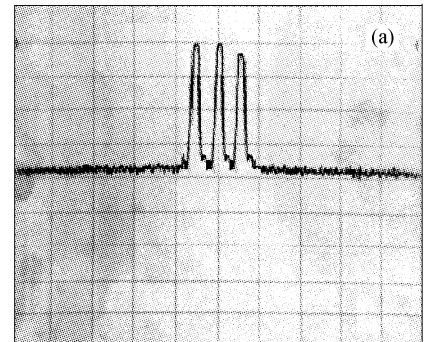
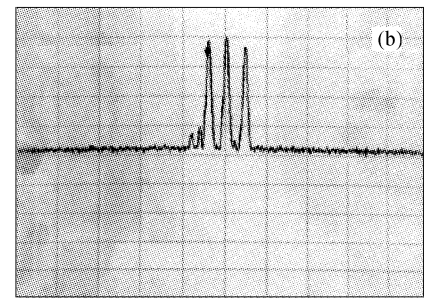
图 2 输出功率与耦合比 R_1 的关系Fig. 2 Relationship of output power and coupler ratio R_1 

图 3 输出功率与掺铒光纤长度之间的关系

Fig. 3 Relationship of output power and Er-doped fiber length

和子腔耦合器 C_1 的耦合比为 1:1。利用 M-Z 干涉仪中耦合器 C_2 的一端口作为激光的输出端,如此既可以减小腔内的损耗又可以减小器件的使用。在没有利用复合腔选频的情况下,激光器的多波长输出如图 4(a)所示。从图中可以得到各谱线的波长分别为 1556.87 nm, 1557.65 nm 和 1558.49 nm, 相应的波长间隔为 0.78 nm 和 0.84 nm, 谱线的宽度约为 0.22 nm, 各波长的功率分别为 2.917 mW, 2.938 mW 和 2.564 mW。可见,各谱线的功率差最大不超过 0.6 dB。

利用复合腔进行选频后,激光的输出谱线如图 4(b)所示。各谱线的波长分别为 1556.26 nm, 1557.05 nm 和 1557.98 nm, 相应的波长间隔分别为 0.79 nm 和 0.93 nm, 各输出波长的功率为 1.286 mW, 1.305 mW 和 0.952 mW。谱线的宽度变窄,约 0.1 nm(受到光谱分析仪的最小分辨率 0.1 nm 的限制)。各波长的间隔刚好为 M-Z 干涉仪的峰值波长间距(实验中选择 $\Delta l = l_1 - l_2$ 为 2 mm),这是易于理解的,因为此时 M-Z 干涉仪在谐振腔内

START 1547.90 nm STOP 1567.90 nm
AD 0.1nm VB 700 kHz ST 90 nsSTART 1547.90 nm STOP 1567.90 nm
AD 0.1nm VB 700 kHz ST 90 ns图 4 环形腔(a)和复合腔(b)多波长输出谱线
Fig. 4 Output spectrum of the multi-wavelength ring laser (a) and composite cavity (b)

作为一梳状滤波器,激射只发生在滤波器的强度透射谱的极大值的位置上。

由图 4(a), (b)可以看出,当无子腔选模时,激光的输出谱线宽,激光的输出功率比子腔选模时大。一是因为在每一条输出波长的带宽(0.22 nm)内主腔决定的振荡模式比复合腔的振荡模式多,二是因为腔内的损耗比复合腔的损耗小,激光的阈值低,使得激光的功率大。

4 结 论

本文所报道的实现多波长光纤激光器的方法,其主要优点是成本低,装置简单易实现,能获得较稳定的三波长输出,其间隔约为 0.8 nm,线宽约 0.1 nm。这种激光器的增益介质无需放在液氮中,而且不需要多个光栅选频或其他复杂而昂贵的器件。但从实验结果看,输出功率的不平坦在 2 dB 左右。在主腔中加入偏振控制器可以使不同波长光得到不同程度的衰减,从而达到输出功率尽可能相同,但其代价是损失功率和增加成本。此外,波长间隔有一定差异,其原因有待探讨。

参 考 文 献

- 1 C. Scheerer, C. Glingener, A. Farbert *et al.*. 3.2 Tbit/s (80 × 40 Gbit/s) bidirectional WDM/ETDM transmission over 40km standard singlemode fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35** (20):1752~1753
- 2 S. Yamashita, K. Hotate. Multiwavelength erbium-doped fiber laser using intracavity etalon and cooled by liquid nitrogen [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(14):1298~1299
- 3 S. Yamashita, K. Hsu, W. H. Loh, Miniature erbium : ytterbium fiber Fabry-Perot multiwavelength lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(8):1058~1064
- 4 Zhang Jingsong, Li Tangjun, Xie Zenghua *et al.*. 4-wavelength, 8-wavelength σ -figure cavity fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):15~17
张劲松,李唐军,谢增华等. σ 形腔 4 波长和 8 波长光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1):15~17
- 5 Yu Youlong, Tan Hwayaw, Wang Qi. Technique for wavelength selectable fiber ring-laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):1~4
余有龙,谭华耀,王 骐. 环形腔光纤激光器波长选择技术[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):1~4
- 6 T. Miyazaki, N. Edagawa, S. Yamamoto *et al.*. A multiwavelength fiber ring-laser employing a pair of silica-based arrayed-waveguide-gratings [J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7):910~912
- 7 N. Park, P. F. Wysocki. 24-line multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11):1459~1461
- 8 H. Takahashi, H. Toba, Y. Inoue. Multiwavelength ring laser compound of EDFAs and an arrayed-waveguide wavelength multiplexer [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1):44~45
- 9 O. Graydon, W. H. Loh, R. I. Laming *et al.*. Triple-frequency operation of an Er-doped twincore fiber loop laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1):63~65
- 10 Seung Kwan Kim, Moo Jung Chu, Jong Hyun Lee. Wideband multiwavelength erbium-doped fiber ring laser with frequency shifted feedback [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**:291~302
- 11 Li Ling, Huang Yongqing. Fiber-optic Communication Foundation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001
李 玲,黄永清 编著. 光纤通信基础[M]. 北京:国防工业出版社,2001
- 12 Peng Jiangde, Yue Chaoyu, Huang Yidong *et al.*. All-fiber tunable and composite cavity ring fiber lasers using ultra low loss fiber couplers [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1992, **12** (1):31~38
- 13 M. Karasek, A. Bellemare. Numerical analysis of multifrequency erbium-doped fiber ring laser employing periodic filter and frequency shifter [J]. *IEE Proc. Optoelectron.*, 2000, **147**(2):115~119

“第五届全国光子学大会”在安徽·黄山召开

由中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会和中国光学学会高速摄影与光子学专业委员会联合主办,中国科学技术大学、安徽大学和中国科学院安徽光学精密机械研究所承办的第五届全国光子学大会于 2003 年 10 月 17—22 日在安徽·黄山举行。有来自国内光学、光电子学、激光、纤维光学、集成光学、光电信息技术等领域的专家和企业界人士 400 多名代表参加了会议。

本次大会由燕山大学于荣金教授主持,王大珩、牛憨笨、侯洵等近 10 位院士出席了会议。牛憨笨院士、林尊琪院士等作了精彩的大会特邀报告。会议

设有 4 个分会,在为期 3 天的报告中,会议代表分别就纤维光学,集成光学,光电与光谱技术,微纳光学与光子晶体,瞬态光学与高速摄影等专题进行了讨论及交流。会议期间国内几家从事产品研发和生产的公司和厂商还举办了产品展示会。本次大会的部分投稿将由《光子学报》以增刊形式出版。

这次会议为我国从事光子学研究领域的专家、学者提供了一个探讨新思想、交流新技术的平台,在一定程度上促进了科研信息的传播和科技成果的转化。

(王体辉)