

文章编号: 0258-7025(2002)08-0677-03

工作在 L -波段的可调谐环形腔 掺铒光纤激光器

杨石泉, 赵春柳, 蒙红云, 袁树忠, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

提要 报道了一种波长调谐范围达 45 nm 的 L -波段环形腔掺铒光纤激光器。利用偏振调谐的方法, 可以使该激光器的工作波长在 1560 nm 到 1605 nm 范围内调谐, 调谐范围几乎覆盖了整个 L -波段。环形腔内用两段铒光纤作为增益介质, 采用二次抽运方式, 由一 980 nm 激光器抽运其中一段铒光纤产生的放大自发辐射作二次抽运源, 再对腔内的两段铒光纤进行抽运, 使它们的增益谱位移到 L -波段, 获得稳定的激光输出。实验中还对环形腔输出耦合器的输出耦合比对激光功率的影响作了研究。

关键词 环形腔, 光纤激光器, 波长调谐, L -波段

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Wavelength Tunable Erbium-doped Fiber Ring Laser Operating in L -Band

YANG Shi-quan, ZHAO Chun-liu, MENG Hong-yun, YUAN Shu-zhong, DONG Xiao-yi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract A novel erbium-doped fiber ring laser utilizing amplified spontaneous emission (ASE) as a secondary pump source so that it can operate in L -band stably was demonstrated. The output wavelength can be tuned in a wide range of 45 nm, from 1560 nm to 1605 nm, by changing the status of a polarization controller in the cavity. The relationship between the output power and the splitting ratio of the output coupler is also studied in this paper.

Key words ring cavity, fiber laser, wavelength tunability, L -band

1 引言

随着计算机网络及其他新的数据传输服务的飞速发展, 长距离光纤传输系统对通信容量的需求增长很快。如何利用现有的光纤传输系统, 进一步提高通信容量, 以满足这种日益膨胀的需求, 已成为光通信领域研究的热点。随着 L -波段掺铒光纤放大器 (EDFA) 研究的不断深入^[1, 2], 将密集波分复用 (DWDM) 系统由传统的 C -波段 (1530 ~ 1565 nm) 延伸到 L -波段 (1570 ~ 1610 nm) 已经是大势所趋。与此同时, 可用作 L -波段通信用光源的光纤激光器在最近一段时间也逐渐成为研究热点^[3, 4]。本文报道了一种工作在 L -波段的波长可调谐环形腔掺铒光

纤激光器, 其波长可调范围达 45 nm, 几乎能覆盖整个 L -波段, 并且输出激光功率大, 稳定性好, 有望成为今后 L -波段通信用光源。

2 实验装置及原理

实验装置如图 1 所示。环形腔主要由两段铒光纤 (EDF1 和 EDF2), 偏振无关隔离器 (PI-ISO), 偏振极化器 (P) 和偏振控制器 (PC) 组成。其中隔离器使光在环形腔内只能单向传输, 避免了当两个不同方向的光在腔内传输时形成的竞争。偏振极化器和偏振控制器一起构成了腔内的波长选择部分, 通过调整偏振控制器的状态可以在输出端得到不同波长

收稿日期: 2001-06-25; 收到修改稿日期: 2001-10-26

基金项目: 天津市科委“160 Gb/s WDM/OTDM 光通信系统”项目资助。

作者简介: 杨石泉 (1975—), 男, 天津人, 现为南开大学现代光学研究所博士生, 主要从事光纤激光器与光纤放大器方面的研究。E-mail: ks0911@sina.com

的激光输出。980 nm 半导体激光器(LD)提供的抽运光通过一 980/1550 nm 波分复用器(WDM)耦合进环形腔对 EDF1 进行抽运。形成的激光经由输出耦合器(C)的一段输出,并用光谱仪(ADVANTEST Q8383)对其进行检测。

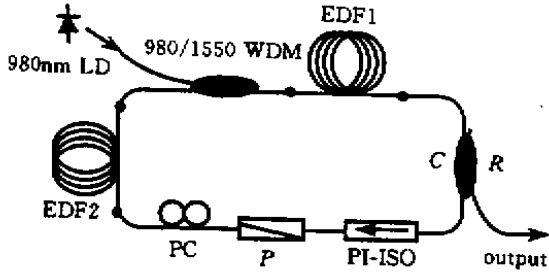


图1 L -波段环形腔光纤激光器结构示意图

Fig.1 Experimental setup of L -band Er-doped fiber ring laser

下面对铒光纤在 L 波段的工作原理和环形腔内偏振调谐原理进行简要的理论分析。

2.1 掺铒光纤在 L 波段的工作原理

由文献[5,6]可知,利用铒光纤在常规波段的放大自发辐射(ASE)可以对另一段铒光纤进行抽运,并且使其增益谱的位置移到 1560 nm 之后。一般铒光纤的 ASE 峰在 1532 nm 附近,整个发射带都可以用作抽运能量,因此这种方法抽运效率很高并且可以消除有害的 ASE 噪声影响,提高输出激光的信噪比。实验中所采用的二次抽运方式就是基于这个原理。输出功率约为 90 mW 的 980 nm 激光器作为一次抽运源,对腔内的 EDF1(进口光纤,长度为 11.5 m,在 980 nm 吸收效率约为 3.8 dB/m,截止波长约为 940 nm,NA = 0.26)进行抽运,产生较强的 ASE 峰。ASE 能量又作为二次抽运源,对 EDF1 和 EDF2(进口光纤,长度为 22 m,在 980 nm 吸收效率约为 1.5 dB/m,截止波长约为 960 nm,NA = 0.27)同时进行抽运。如果腔内铒光纤的总长度比较短,ASE 能量不能得到充分利用,增益谱位置不能完全移到 L -波段,这时激光器不能很好地工作在 L -波段,并且在 C -波段也会有激光产生。选择合适的光纤长度,使二次抽运后,原 1532 nm 附近的 ASE 能量大部分被吸收,铒光纤的增益谱完全位移到 1560 nm 以后,这时激光器只在 L -波段产生激光。对于工作在 L -波段的放大器来说,一般要求铒光纤的长度较长,在 85 m 到 100 m 左右^[7],但对于环形腔结构的光纤激光器来说,由于光在腔内形成谐振,抽运能量能够得

到反复利用,所以不需要很长的铒光纤就能使其在 L -波段稳定工作。在实验中仅用 11.5 m 和 22 m 铒光纤就能达到使腔内增益谱位移到 L -波段的目的。

2.2 环形腔内的偏振调谐原理

设用 $P(\theta)$ 表示从偏振极化器 P 出来的线偏振光,其中 θ 为该线偏光相对于某一固定的实验室坐标系 x 轴的夹角。由于环形腔内光纤的双折射效应,该线偏光在环内传输一圈后再回到 P 时,其偏振态不可避免地要发生变化。并且由于光纤中的偏振色散,不同波长的光在传输一圈后偏振态的变化也不同。当这些不同偏振态的偏振光再次经过 P 后,其所受到的损耗与其偏振方向和 P 的偏振极化方向之间的夹角有关,当夹角越小时损耗也越小,所以不同波长的光在腔内传输一圈所受到的损耗也不同。对某一波长的光来说,如果这个损耗足够小,以至于这个波长的光在腔内传输一圈时所得到的增益足以弥补其在腔内的损耗,它就能在环形腔内维持激光振荡。

如果用 $M(\lambda)$ 来表示环形腔内光纤的双折射效应,则腔内激光的谐振条件可以表示为^[8]

$$|P^*(\theta) \cdot M(\lambda) \cdot P(\theta)| e^{\alpha(\lambda)L} \cdot T_{\text{eff}} = 1 \quad (1)$$

其中 $P^*(\theta)$ 为 $P(\theta)$ 的哈密顿共轭函数, $\alpha(\lambda)$ 为波长为 λ 的光在腔内的增益系数, L 为腔内增益介质的长度, T_{eff} 为腔内器件总的光透过率。由方程(1)可以看出,通过调整腔内的偏振控制器的状态,使腔内的双折射发生改变,即使 $M(\lambda)$ 发生变化,可以达到波长调谐的目的。在实际应用中,由于用偏振控制器调节光纤内的双折射状态精确程度不够高,所以这种调谐方法不利于波长的精密调谐。但与腔内使用可调谐滤波器的方法^[3,4]相比,这种偏振调谐的方法具有插入损耗小、成本低、调谐范围大等优点,有一定的应用前景。

3 实验结果分析与讨论

实验中获得的激光器的输出波长在 1560 nm 到 1605 nm 范围内可调,其调谐范围宽达 45 nm,几乎能覆盖整个 L -波段。图 2 为通过调整环形腔内 PC 的状态而得到的不同波长激光输出的光谱图。不同波长激光的功率都大于 1 mW (0 dBm),最大可达到 3.7 mW (5.72 dBm),3 dB 带宽窄于 0.3 nm,光信噪比在 30 dB 以上。图 3 为扫描间隔为 1 min,共 16 次扫描的激光光谱图,可以看出输出激光的稳定性很好。

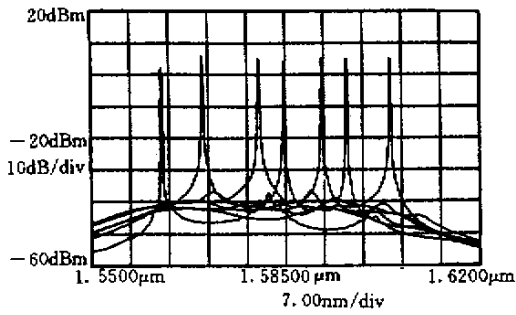


图2 激光器输出的不同波长的激光光谱图
(从左到右分别对应为:1562.6 nm, 1570.0 nm, 1580.0 nm, 1584.6 nm, 1591.6 nm, 1596.1 nm 和 1604.0 nm)

Fig.2 Output optical spectra of fiber laser operating at different wavelength

(From left to right: 1562.6 nm, 1570.0 nm, 1580.0 nm, 1584.6 nm, 1591.6 nm, 1596.1 nm and 1604.0 nm)

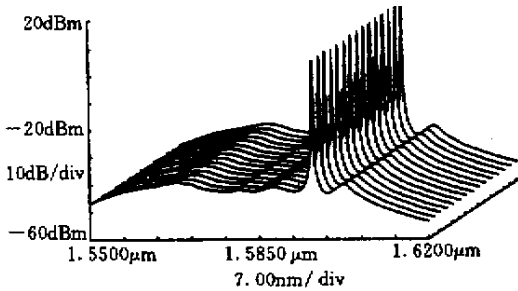


图3 扫描间隔为 1 min,共 16 次扫描的激光光谱图

Fig.3 16 times repeated scans of output laser with 1 minute interval

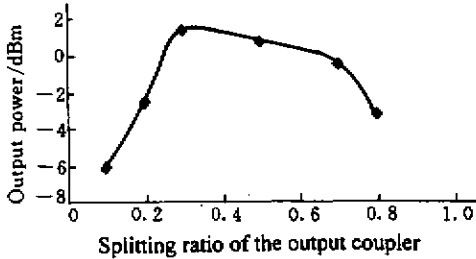


图4 激光功率与耦合器输出耦合比之间的关系曲线

Fig.4 Relationship between the output power and splitting ratio of the output coupler

实验中观察到输出激光的功率与输出耦合器 C 的输出耦合比有关。图 4 为采用不同输出耦合比时某一固定波长的激光功率变化曲线,可以看出当输出耦合比在 0.3 左右时,激光器能得到最大功率的激光输出。这点与 C -波段的光纤激光器有些不同(一般输出耦合比在 0.8 ~ 0.9 时可获得最大输出)^[9,10]。这主要是由于 L -波段放大的抽运光(包括 980 nm 抽运能量和 ASE 抽运能量)的转换效率相

对于 C -波段来说小很多^[21],因此必须使抽运光能在腔内反复循环才能被更有效地利用而获得较强的 L -波段放大效果。较小的输出耦合比有利于抽运光在腔内循环,因而抽运能量可以得到充分的利用,有利于形成功率较大的激光输出。但如果输出耦合比太小的话,大部分光被限制在环形腔内,只有一小部分能够输出,因此得到的激光功率也不会太大。当然最佳的输出耦合比与腔内铒光纤的长度和 980 nm 抽运光的强度都有关系,当所用的铒光纤较长或抽运能量较小时,由于抽运能量在传输一圈的过程中能够被吸收得更充分,这时最佳输出耦合比的值会变大一些。

输出激光的功率还与 EDF2 在环形腔内的位置有关。如果将 EDF2 置于 EDF1 和 C 之间,那么 980 nm 激光器抽运 EDF1 产生的正向 ASE 能够得到充分利用,而背向 ASE 则被隔离器吸收而浪费掉了,所以输出的激光强度会降低。而在图 1 所示的结构中,背向 ASE 也能被 EDF2 所吸收利用,因此抽运效率要高许多,有利于得到功率较大的激光输出。

参 考 文 献

- 1 F. A. Flood. L -band erbium-doped fiber amplifiers [C]. OFC '2000, paper WG-1
- 2 J. F. Massicot, J. R. Armitage, R. Wyatt *et al.*. High gain, broadband, 1.6 μm Er^{3+} doped silica fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(20):1645 ~ 1646
- 3 J. M. Oh, H. B. Choi, D. Lee *et al.*. Efficient tunable fiber ring laser for 1580 nm band with a fiber Bragg grating [C]. OFC '2001, paper WA-6
- 4 S. K. Kim, M. J. Chu, J. H. Lee. L -band multi-wavelength erbium-doped fiber laser [C]. OFC '2001, paper WDD-19
- 5 J. Lee, Uh-Chan Ryu, S. J. Ahn *et al.*. Enhancement of power conversion efficiency for an L -band EDFA with secondary pumping effect in the unpumped EDF section [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):42 ~ 45
- 6 Hirota Ono, Makoto Yamada, Terutoshi Kanamori *et al.*. 1.58- μm band gain-flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):490 ~ 496
- 7 A. Buxens, H. N. Poulsen, A. T. Clausen *et al.*. Gain flattened L -band EDFA based on upgraded C -band EDFA using forward ASE pumping in an EDF section [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(9):821 ~ 823
- 8 U. Ghera, N. Konforti, M. Tur. Wavelength tunability in a Nd-doped fiber laser with an intracavity polarizer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1):4 ~ 6
- 9 T. Pfeiffer, H. Schmuck, H. Bülow. Output power characteristics of erbium-doped fiber ring lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8):847 ~ 849
- 10 Yang Xiufeng, Zhao Donghui, Ge Chunfeng *et al.*. Research on the output characteristics of fiber ring laser [J]. *Acta Optics Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9):1193 ~ 1196 (in Chinese)