

大功率高效率掺铒超荧光光纤光源及其应用

陈胜平 吕可诚 李乙钢 盛秋琴 朱剑平 李家方 冯 鸣

(南开大学物理科学学院光电信息科学系,天津,300071)

摘要 采用光纤反射环境和双程后向结构,得到了最大输出功率30.6 mW、光光转换效率42.0%的大功率、高效率全光纤掺铒超荧光光源(SFS). 利用串接光纤光栅(FBG)和光纤型F-P腔,对其进行光谱分割,得到了稳定的多波长输出. 实验结果和探讨对光谱分割多波长光源的研制具有指导意义.

关键词 超荧光光源(SFS);多波长光源;掺铒光纤(EDF);大功率;高效率

中图分类号 TN212;TN24 **文献标识码** A

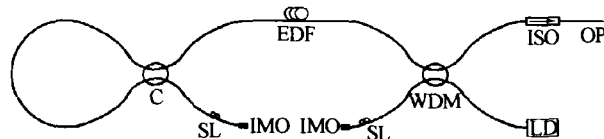
0 引言

近年来,掺铒(Erbium-Doped, ED)超荧光光纤光源(Superfluorescent Fiber Source, SFS)得到了广泛、深入、细致的研究^[1-10],与传统的宽带光源(发光二极管)相比,ED-SFS具有输出功率高、稳定性好、寿命长和与光纤完全兼容等优点. 在光纤陀螺,光纤传感、光纤无源器件制作监测等很多领域具有广泛的应用前景. 波分复用通信系统和分布式多点传感技术的发展,又促进了光谱分割技术在ED-SFS中的应用^[11,12]. 与传统的多波长光源(分布反馈式半导体激光器阵列)相比,利用宽带SFS,通过光谱分割技术得到的多波长光源,在稳定性、散热性、寿命、兼容性和价格等方面具有绝对优势. 而且,对SFS进行光谱分割产生的光为非相干光,应用在传感技术中可以减少因相干产生的误差.

本文报道了一种基于光纤反射环境^[13]和双程后向结构^[1]的大功率、高效率ED-SFS,在72.8 mW、980 nm光泵浦下,未经放大得到了30.6 mW输出,光光转换效率高达42.0%,比L. A. Wang等人^[2]采用镀膜反射镜和相似结构得到的约31.7%的转换效率高出10.3个百分点. 利用串接布喇格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)进行光谱分割,在没有任何放大的情况下,得到了位于通讯波段的高稳定性多波长输出,单波长功率在百微瓦量级. 利用自制的光纤型F-P腔进行光谱分割,得到了波长间隔符合ITU信道间隔标准的多波长输出. 对光谱分割实验结果进行了有益的探讨,并提出了改进方案.

1 大功率、高效率 ED-SFS

图1为ED-SFS的实验装置. 半导体激光器发出980 nm激光,经由980/1550 nm波分复用耦合器进入15 m长、掺杂浓度约600 ppm的掺铒光纤(Erbium-doped Fiber, EDF)中. 一3 dB耦合器的同端光纤被熔接在一起,构成宽带全反镜^[13],与EDF另一端熔接,用来反射前向荧光. 一光隔离器与波分复用耦合器输出端相接,避免由4%光纤端面反射与宽带反射环境构成谐振腔,产生激光振荡;同时也可在实际应用时阻隔诸如光纤陀螺仪和传感器等的反馈光,消除不稳定因素. 整个装置构成双程后向超荧光光源.



C: Coupler; SL: Small loops; IMO: Index matching oil; EDF: Erbium-doped fiber; WDM: Wavelength division multiplexer; ISO: Optical isolator; LD: Laser diode; OP: Optical output port

图1 大功率、高效率掺铒超荧光光纤光源实验装置
Fig. 1 Configuration of high output power erbium-doped superfluorescent fiber source

波分复用耦合器对1550 nm光的插入损耗约为0.3 dB;3 dB耦合器插入损耗小于0.1 dB;光隔离器插入损耗约0.6 dB,隔离度大于50 dB;所有熔接点损耗之和估计小于0.3 dB. 整个光源的损耗合计约1.2 dB.

图2为所述SFS的功率特性曲线. 横坐标表示的是EDF入纤功率,在WDM与EDF的连接端口测量得到;纵坐标为超荧光输出功率,在图1中所示的输出端口测量得到. 该光源的泵浦阈值8.3 mW、斜率效率47.3%. 在72.8 mW的最大泵浦功率下,超荧光输出功率为30.6 mW,相应的转换效率为42.0%. 考虑到实验装置中各种元器件对1550 nm光约1.2 dB的损耗,转换效率已经接近量子转换极限. 如此高

*国家高技术研究发展计划(2003AA312100)、国家自然科学基金(60377010)资助项目
Tel:022-23503621 Email: chenshengping@eyou.com
收稿日期:2003-07-10

的转换效率主要得益于双程后向结构和光纤反射环境的采用. 实验中所用光纤反射环境在整个 C 波段都有约 99% 的反射率. 而且, 经过测试, 该反射环境对 980 nm 泵光也有一定的反射率, 这使得泵浦能量可以得到更为充分有效的利用, 因而, 能够实现高转换效率.

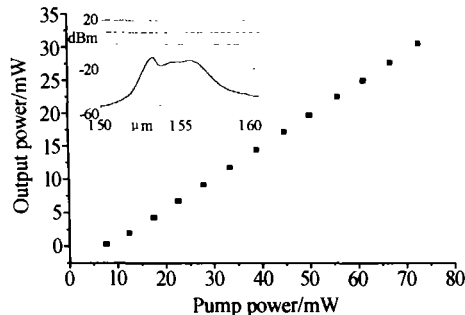


图 2 掺铒超荧光光纤光源的输出功率特性曲线, 插图为最大泵浦功率下的输出光谱图

Fig. 2 Variation of output power versus pump power of the superfluorescent fiber source. Inset is the output spectrum at maximum pump power

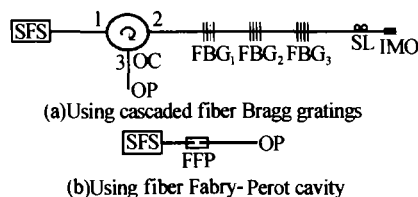
图 2 中的插图为最大输出功率时的光谱特性曲线. 该 ED-SFS 的平均波长为 1544.4 nm, 3 dB 带宽 29.2 nm. 可以看出, 输出光谱在 1550 nm 附近有约 15 nm 的光谱平坦区. 如果采用间隔为 0.8 nm 的梳状滤波器对该平坦区进行光谱分割, 可以得到具有约 20 个波长的近似等功率多波长输出.

实验中所用耦合器对 980 nm 泵光的分光比并不是 1:1, 因此反射环境对泵光反射率较低. 如果采用特制耦合器, 使其在 1550 nm 和 980 nm 均具有 1:1 分光比, 代替图 1 中的耦合器, 转换效率会得到进一步提高. 但是, 经过 EDF 的吸收, 此处泵光已经较弱, 这种方法并不能大幅提高转换效率. 实验中所用光隔离器的插入损耗较大, 如果在诸如吸收光谱分析等没有光反馈的应用场合, 可以用 8° 斜角光纤端面代替光隔离器, 可大幅度提高转换效率.

2 光谱分割多波长光源

2.1 利用串接 FBG 进行光谱分割

图 3(a) 为利用串接 FBG 进行光谱分割的实验装置. 在光环行器的 2 端口串接上 FBG 进行光谱



SFS: Superfluorescent fiber source; FFP: Fiber Fabry-Perot cavity; OP: Optical output port; OC: Optical circulator; FBG: Fiber Bragg grating; SL: Small loops; IMO: Index matching oil

图 3 光谱分割实验装置

Fig. 3 Experimental arrangement of spectrum slicing

选择. 光环行器的 3 端口为输出端口. 三个 FBG 反射中心波长分别为: 1546.8 nm、1548.9 nm 和 1550.6 nm, 相应的反射率分别为: $\sim 95\%$ 、 $\sim 98\%$ 和 $\sim 97\%$, 反射半宽分别为 0.23 nm、0.38 nm 和 0.3 nm. 光环行器的插入损耗约 0.9 dB.

FBG 的连接顺序以尽量减少相互干扰为准. 通常 FBG 对其反射中心短波端的光具有较大损耗, 因而, 将波长较小的 FBG 放在靠近 SFS 一端, 波长较大的 FBG 放在远离 SFS 一端, 使得较短波长的光先被反射, 可以尽量降低远离 SFS 的 FBG 的反射光经过靠近 SFS 的 FBG 时产生的附加损耗.

图 4 为得到的三波长输出光谱图. 从图中可以看出, 输出光边模抑制比约 20 dB, 在 -35 dBm 以下, 三波长的光谱已经重叠在一起, 造成一定程度的相互影响. 为了详细研究这一影响, 实验测量了利用单个 FBG 选频和三个 FBG 同时选频时的输出功率. 将 LD 电流置于最大值, 利用三个 FBG 分别单独进行选频, FBG₁、FBG₂ 和 FBG₃ 分别给出 0.147 mW、0.213 mW 和 0.112 mW 的输出功率. 由于 FBG 的反射带宽、反射率和反射光谱形状不同引起三个 FBG 得到的输出功率不尽相同. 由光谱分割的原理可知, 反射率的细微变化产生的影响不会太大, 而反射光谱包罗面积对输出光功率具有决定作用. 三个 FBG 同时选频得到 0.401 mW 输出, 比单个 FBG 分别选频得到的输出功率之和小, 一方面由光谱重叠引起, 另一方面, 源于 FBG 对非 Bragg 波长光的损耗. 对于质量较好的 FBG 而言, 如果按照前述排列顺序串接, 后者产生的影响应该很小. 因此, 实际应用中应尽量选取反射带宽窄的 FBG, 避免由于光谱重叠产生的各信道相互影响.

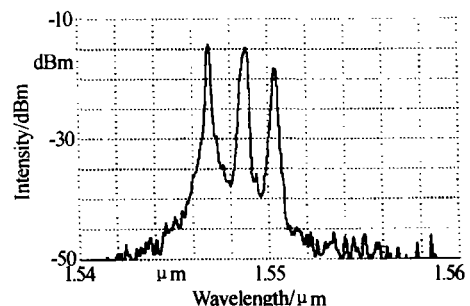


图 4 利用串接光纤光栅进行光谱分割的输出光谱图

Fig. 4 Optical spectrum of cascaded fiber Bragg gratings sliced superfluorescent fiber source

实验中用 LP-3A 型光功率计测量输出光功率, 最小分辨率为 $1 \mu\text{W}$. 如果保持环境温度不变, 输出的三波长光在波长和功率两个方面都具有非常好的稳定性, 其功率起伏用此光功率计已经分辨不出来. 为了更准确的测量相对功率起伏, 实验中利用 HP 70952B 型光谱仪进行观测. 由于受分辨率的影

响较大,用光谱仪进行绝对功率测量所得的结果不一定可靠,但其相对功率起伏的测量结果应该是可信的.观测功率起伏时,将光谱仪的扫描范围设为 10 nm,采用 0.1 nm 分辨率,灵敏度 10 pW (-80 dBm).在大于 30 min 的观察时间内,光谱仪显示三波长光功率相对起伏均小于 0.5%,应该说是相当稳定的.

实验中观察到输出波长随温度变化量级在 0.01 nm/°C,这由 FBG 布喇格波长随温度的漂移引起.在实际应用时,可以采取对 FBG 进行温度减敏封装或温度补偿等方法减弱甚至消除输出波长的温度依赖性.

2.2 利用光纤型 F-P 腔进行光谱分割

实验装置如图 3(b).其中的光纤型 F-P 腔由两根端面镀膜的光纤构成,膜层对 C 波段光的反射率约为 60%,通过调节架实现纤芯的精确对准,两光纤端面间距可调.由于光纤端面只是经过简单的抛光处理后镀膜,对光无聚束效应,因而图中的 F-P 腔插入损耗很大,具体损耗多少与纤芯的对准精度、光纤端面间距相关.

在光纤端面间距调节到约 1.5 mm 时,得到了如图 5 所示的多波长输出.波长间隔约 0.8 nm,输出光功率约 0.1 mW.改变镀膜光纤端面间距,波长间隔随之变化,输出功率也有所改变,但保持在同一量级.考虑到其光谱筛选作用,该 F-P 腔梳状滤波器的插入损耗约为 21.5 dB.如此高的损耗导致了其调制深度只有约 50%,由其分割出的多波长光边模抑制比因而也只有 3 dB 左右,远远不能满足实际应用要求.

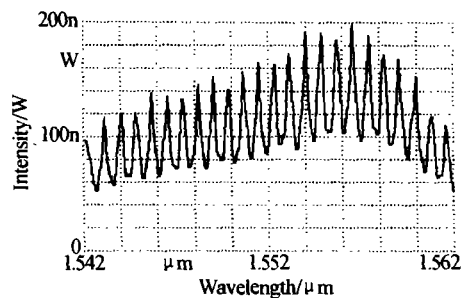


图 5 利用光纤型 F-P 腔进行光谱分割的输出光谱图
Fig.5 Optical spectrum of fabry-perot cavity sliced superfluorescent fiber source

该方案的优点在于灵活可调,光纤端面间距决定了波长间隔,很容易得到符合 ITU 信道间隔标准的多波长输出.通过改进工艺便可使其达到实用水平.第一种改进方法是在镀膜之前先将光纤端面磨成球形或椭圆形,使其出射光为平行光,降低其插入损耗.第二种改进方法是在自聚焦棒上镀膜,利用两自聚焦棒端面形成 F-P 腔.前一方案可以保持器件原来的微小体积,在集成光路中作为光源使用;后一方案体积有所增加,但可以做到非常小的插入损

耗,大大提高调制深度和精细度.而且,在自聚焦棒较大面积的端面上镀膜要比在光纤头上镀膜易于操作和实现,膜层反射率也可大大提高,因而精细度和调制深度可以进一步增加.

3 结论

采用双程后向结构,利用光纤反射环镜反射前向自发辐射荧光,得到了受限于泵浦功率的 30.6 mW 超荧光输出,相应的光光转换效率为 42.0%.考虑到各种损耗因素,该结构超荧光光源的效率已经接近量子转换极限.利用串接 FBG 进行光谱分割,在没有任何光放大的情况下,得到了单波长功率在百微瓦量级的高稳定性多波长输出.利用自制的简易光纤型 F-P 腔进行光谱分割,得到了信道间隔符合 ITU 标准的多波长输出.对迈向实用化的改进方案进行了有益的探讨.实验结果和讨论对 SFS 光谱分割多波长光源的研制具有指导意义.

参考文献

- 1 Wang L A, Chen C D. Characteristics comparison of Er-doped double-pass superfluorescent fiber sources pumped near 980 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9** (4): 446 ~ 448
- 2 Wang L A, Chen C D. Comparison of efficiency and output power of optimal Er-doped superfluorescent fibre sources in different configurations. *Electronics Letters*, 1997, **33** (8): 703 ~ 704
- 3 Okhotnikov O G, Sousa J M. High power superfluorescent source with stable single-transverse-mode output using a multimode Er-doped fibre. *Electronics Letters*, 1997, **33** (20): 1727 ~ 1728
- 4 Tsai S C, Tsai T C, Law P C, et al. High pumping-efficiency L-band erbium-doped fiber ASE source using double-pass bidirectional-pumping configuration. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15** (2): 197 ~ 199
- 5 Zatta P Z, Hall D C. Ultra-high-stability two-stage superfluorescent fibre sources for fibre optic gyroscopes. *Electronics Letters*, 2002, **38** (9): 406 ~ 408
- 6 乔启全, 陈柏, 陈嘉琳, 等. 用于光纤光栅制作的监控光源掺 Yb³⁺ 超荧光光源的研究. *光子学报*, 2003, **32** (1): 1 ~ 4
Qiao Q Q, Chen B, Chen J L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32** (1): 1 ~ 4
- 7 李乙钢, 刘伟伟, 付成鹏, 等. 大功率掺 Yb 双包层光纤宽带超荧光光源. *光学学报*, 2001, **21** (10): 1171 ~ 1173
Li Y G, Liu W W, Fu C P, et al. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21** (10): 1171 ~ 1173
- 8 沈林放, 钱景仁. 高稳定宽频带掺铒光纤超荧光光源. *光学学报*, 2001, **21** (3): 300 ~ 304
Shen L F, Qian J R. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21** (3): 300

~ 304

- 9 钱景仁,陈登鹏,沈林放,等. 前向抽运双级双程掺铒光纤宽带光源. 中国激光,2001,A28(12): 1075 ~ 1078
Qian J R, Chen D P, Shen L F, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, A28(12): 1075 ~ 1078
- 10 黄文财,明海,谢建平,等. L波段掺铒光纤超荧光光源和放大器研究. 光电工程,2002,29(6): 50 ~ 52
Huang W C, Ming H, Xie J P, et al. *Opto-Electronic Engineering*, 2002,29(6): 50 ~ 52
- 11 Su C D, Wang L A. Multiwavelength fiber sources based on double-pass superfluorescent fiber sources. *Journal of Lightwave Technology*, 2000,18(5): 708 ~ 714
- 12 范小波,郝素君,陈志勋. WDM系统中光谱可分割光纤光源的实验研究. 上海交通大学学报,2002,36(5): 675 ~ 677
Fan X B, Hao S J, Chen Z X. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2002,36(5): 675 ~ 677
- 13 David B. Mortimore. Fiber loop reflectors. *Journal of Lightwave Technology*, 1988,6(7): 1217 ~ 1224

High Power, High Efficiency Erbium-doped Superfluorescent Fiber Source and its Applications

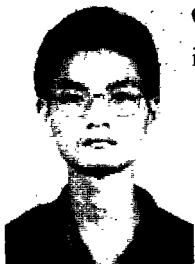
Chen Shengping, Lü Kecheng, Li Yigang, Sheng Qiuqin, Zhu Jianping, Li Jiafang, Feng Ming

Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

Received date: 2003-07-10

Abstract A fiber loop mirror is employed in an erbium-doped double pass backward (DPB) superfluorescent fiber source (SFS), to realize a robust all-fiber SFS. Output power as high as 30.6 mW with pump efficiency of 42.0% is achieved under the pumping of 980 nm Laser Diode (LD). Three fiber Bragg gratings (FBG's) are utilized for the purpose of spectrum slicing. A rather stable tri-wavelength fiber source is got with total output power of 0.401 mW in the absence of any amplifier. A self-made fiber Fabry-Perot cavity is used for spectrum slicing, too. It brings out a multi-wavelength output with ~ 0.8 nm channel spacing, which satisfies the requirements of ITU standard. Experimental results and discussions will be useful in manufacture of SFS based multi-wavelength fiber sources.

Keywords Superfluorescent fiber source (SFS); Multi-wavelength; Erbium-doped fiber (EDF); High power; High efficiency



Chen Shengping was born in 1979, received the B. S. from Nankai University in 2001. Now, he is reading for master's degree in the same university. His research interest is fiber lasers.