

文章编号 1004-924X(2005)02-0205-06

基于光纤环形镜的 C+L 波段高 平坦高功率掺铒光源

乔学光, 郭小东, 贾振安, 傅海威, 赵大壮, 周红, 王小凤, 刘颖刚
(西安石油大学 光纤传感实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:研究并设计了一种用 3 dB 宽带耦合器制作的光纤环形镜作为反射镜的双级双程单管抽运高平坦度高功率 C+L 波段 ASE 光源。用 2 个 980 nm 激光二极管调试两级抽运光功率的分配, 两级采用掺铒浓度不同的光纤并优化光纤长度, 获得了功率高达 15.28 mW(11.84 dB/m)的 C+L 波段 ASE 光输出, 平均波长为 1 559.31 nm, 在未采用任何外加滤波器的情况下, 其平坦区域 3 dB 带宽 66.72 nm(从 1 533.12 nm 至 1 599.84 nm)。之后采用一个激光二极管实现两级双向同时抽运得到了同样的效果。通过光纤环形镜的使用, 不仅提高了抽运源利用效率, 且改善了光源的平坦度, 在实验过程中, 在平坦度相度相对要差一些的情况下, 还通过调整两级抽运光的功率及分配比例得到了功率达到 30.11 mW 的 C+L 波段 ASE 输出。

关键词:C+L 波段; 掺铒光纤(EDF); 超宽带光源; 光纤环形镜; 放大自发辐射(ASE)

中图分类号:TN25, TP722, TQ342 **文献标识码:**A

High power, high flattening C+L band erbium-doped fiber source based on fiber loop mirror

QIAO Xue-guang, GUO Xiao-dong, JIA Zhen-an, FU Hai-wei,
ZHAO Da-zhuang, ZHOU Hong, WANG Xiao-feng, LIU Ying-gang

(*Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China*)

Abstract: A fiber loop mirror that is made from 3 dB coupler is employed in dual-stage double-pass one pumping LD configuration, in order to realized high flattening C+L band ASE with high output power. By using two 980 nm LDS, ratio of two stage is acquired, Through optimization of parameter of fiber of the two stage, output ASE of C+L band with power of 15.28 mW(11.84 dB/m) is achieved, and mean wavelength is 1 559.31 nm, without any external spectral filter, power ripple of 3 dB is

收稿日期:2005-02-15;修订日期:2005-04-01.

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(No. 2002AA313150);国家自然科学基金项目:(No. 60177028);国家教育部科学技术重点项目(No. 02190);陕西省科技攻关项目:(No. 2003K015J-28);西安市工业科技攻关计划项目:(No. GG200126)

66.72 nm (from 1 533.12 to 1 599.84 nm). Fiber loop mirror was used as reflector in the configuration, to enhance the efficiency of LD and improve flatness of spectrum, From the experiment, the best ultra bandwidth ASE source with high output power of 30.11 mW is acquired by adjusting the bi-directional pump power of LDs, besides low demands for flatness.

Key words: C+L band; erbium-doped fiber; ultra broadband light source; fiber loop mirror; amplified spontaneous emission (ASE)

1 引言

掺铒光纤宽带光源与传统的宽带光源 (SLD) 相比, 由于具有温度稳定性好、荧光谱线宽、输出功率高, 使用寿命长及与光纤完全兼容等特点, 在光纤光栅分布式传感、光纤陀螺、EDFA 测量、DWDM、光纤探测器、光谱测试、无源器件制作监测以及低成本接入网等很多领域具有广泛的应用前景。

随着 C-波段 (1 520~1 570 nm) 光源的研究^[1-3] 越来越趋向成熟并迈向市场化, 且由于迅速增长的光通信对带宽的要求, 为满足将来人们对通信容量的更大需求, DWDM 系统正在继续开拓 L-波段 (1 570~1 620 nm) 的资源, 扩展 L-波段光源及相关器件的研究便显得尤为迫切^[4-11], 同时, 在分布式光纤光栅传感中, 为了满足大范围、密集多点分布传感点的应用, 则需要高功率、宽带宽的 ASE 光源, 因此使得 C+L 段光源便成为研究的焦点^[6,10-11]。

本文通过分析光源结构、抽运功率及光纤浓度对光纤输出性能的影响, 设计了一种基于光纤环形镜^[4,12-14] 的双级双程结构高平坦光源, 并通过实验进行了验证, 得到了一种高功率 (高于 15 mW)、宽带宽的 C+L (80 nm 以上) 波段光源, 平均波长为 1 559.31 nm, 平坦区域的 3 dB 带宽达 66.72 nm (从 1 533.12 nm 至 1 599.84 nm) (在不用任何外加滤波器的情况下, 通常情况多采用长周期光纤光栅等作为波形平坦化元件^[15])。其中, 采用两段浓度不同的掺铒光纤作为增益介质, 通过实验过程

的调整, 将通常采用的双抽运源的结构进行分析后, 优化为用一个 980 nm 二极管作为抽运源, 不仅结构更为紧凑, 而且降低了整个系统的成本, 调节两级之间的分光比达到合适配比, 并采用由普通 3 dB 耦合器制作而成的光纤环形镜作为反镜提高光源的效率, 并调整光谱, 得到了较好的效果。而且在实验过程中, 当调整两级抽运光的功率及分配比例时得到了功率达到 30.11 mW 的 C+L 波段 ASE 光输出, 只是光源平坦度相对要差一些。

2 光纤环形镜反射原理

将 2×2 熔融拉锥型耦合器的两个输出端熔接在一起即可以构成光纤环形镜, 且是一种宽带反射镜, 结构如图 1 所示, 此结构在光传感 (如光纤陀螺) 中称为 Sagnac

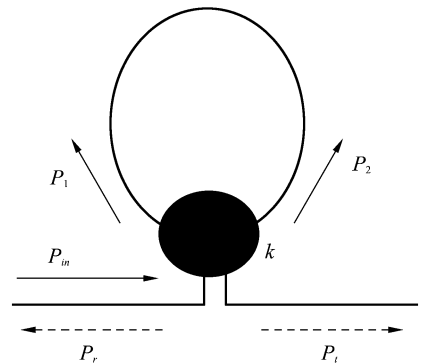


图 1 光纤环形镜结构示意图

Fig.1 Setup of the fiber loop mirror

干涉仪。当输入光信号从普通宽带耦合器的一端输入时, 它在耦合器的两个输出端口被分成顺时针方向和逆时针方向相反的

两束光,经过传输后,这两束光在耦合器的耦合区相干后,从信号输入端输出形成反射光,从另一端输出形成透射光。设耦合器的能量分光比为 k ,在忽略耦合器本身损耗和光纤损耗的前提下,当入射光功率为 P_{in} 时,反射光功率 P_r 和光透射功率 P_t 分别为:

$$P_r = 4k(1-k)P_{in}, \quad (1)$$

$$P_t = (1-2k)^2 P_{in}. \quad (2)$$

则由式(1)和(2)可得光纤环形镜的反射率 R 和透射率 T 可以表示为

$$R = 4k(1-k), \quad (3)$$

$$T = (1-2k)^2. \quad (4)$$

由器件对称性可知,则器件满足关系式

$$\begin{bmatrix} P_r \\ P_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4k(1-k) & (1-2k)^2 \\ (1-2k)^2 & 4k(1-k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \text{ 即 该}$$

器件的传输矩阵可写为

$$\begin{bmatrix} 4k(1-k) & (1-2k)^2 \\ (1-2k)^2 & 4k(1-k) \end{bmatrix}.$$

图 2 中的实线和虚线分别为 R 和 T 随 k 的理论变化曲线,显然,当分光比 k 为 0 或 1 时,都有 $R=0, T=1$,此时该结构起到全透射镜的作用; $k \approx 0.147$ 或 $k \approx 0.853$ 时,即两曲线的交点处的 $R=T=0.5$,此时该结构起到半透射半反射的作用;而当 $k=1/2$ 时(3 dB 耦合器)则有 $R=1, T=0$,这时该结构起到了全反射镜的作用,而在实际中则由于熔接会带来一定的损耗。

3 光源原理及结构

则以上述的 3 dB 宽带光纤耦合器组成近似 100%全反射镜反射率接近 100%,以此为光源中的反射镜,组成如图 3 所示的双级双程光源结构,其中第 1 级采用掺铒浓度为 0.7×10^{-3} 的光纤,截止波长为 853.5 nm,在 1 200 nm 处的本底损耗 ≤ 50 dB/km,在 980 nm 处的峰值吸收系数为 4.5 dB/m,数值孔径 ≥ 0.2 ,模场直径为

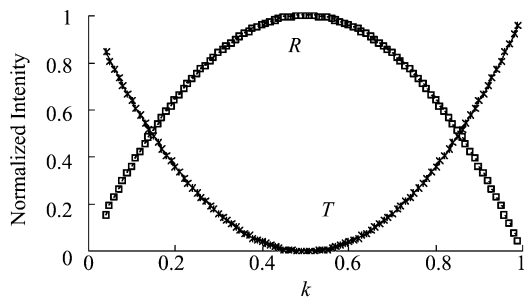


图 2 光纤环形镜反射、透射率随耦合比的变化曲线

Fig. 2 Character of R and T with k of the fiber loop mirror

6.68 μm ,所用长度为 7 m;第 2 级光纤的掺铒浓度为大于 1.9×10^{-3} ,截止波长为 960 nm,980 nm 峰值吸收为 8.6 dB/m,1 530 nm 附近峰值吸收为 14.2 dB/m,所用长度为 31 m。实验中用 980 nm 激光二极管作抽运光源,中心波长为 979.04 nm,阈值电流为 27.8 mA,在实验中最终实现了用一个 980 nm 的耦合器分光后给两级提供抽运光信号。实验中结果均为采用 Anritsu MS9710C 多功能光谱仪和 PMS-12 光功率计测得。光谱仪最小分辨率为 0.05 nm,测量范围为 600~1 750 nm,光功率计的测量精度为 0.01 dB/m。

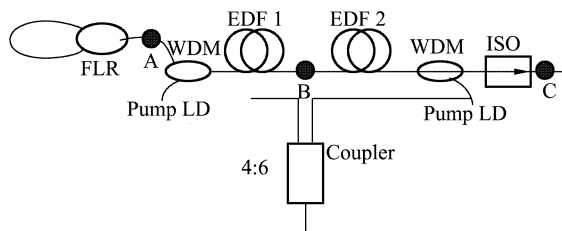


图 3 C+L 波段光源结构示意图

Fig. 3 Setup of output C+L band ASE

4 实验结果

为了说明上的方便,将与抽运光相同传播方向的称之为前向,反之为后向。则

第 1 级为双程前向结构,第 2 级为后向结构。由于第 1 级光纤长度较短,浓度较低,则第 1 级结构无论是前向 B 点还是后向 A 点得到的均为 C-波段 ASE 光输出;对于单独第 2 级,光纤较长且浓度高,相比第 1 级有明显的区别,在其后向 C 点可得到较高功率的 C-波段光信号输出,实验中单级可以得到典型光谱如图 4 所示的功率为高于 30 mW 的 C 波段 ASE 光输出,前向 B 点则得到的 L-波段的 ASE 光,其典型光谱如图 5 所示,在单程情况下光功率相对比较微弱。

用两个抽运源进行调节,便于实验中的调节及对实验过程的观察分析,最终实现抽运源为由 1 个 150 mW 的 980 nm 的激光二极管通过 4:6 功率耦合器分光后分别供给两级抽运能源,使得结构简单,降低系统复杂性,减少系统成本,有利于系统的产品化并具有优势。而双级结构可以分别处理光谱的调整和功率的放大两个问题,双级结构第 1 级输出光主要为调整第 2 级输出的 C-波段和 L-波段光,一方面削弱了后向的 C-波段 ASE 光的大小,另一方面,将前向 L-波段的光进行放大调整,重新引回光纤中,通过两级长度与抽运光的匹配,可以达到 C+L 波段的高功率高平坦度 ASE 光输出。在实验中得到输出功率为 15.28 mW(11.84 dB/m),测得光谱如图 6 所示,平均波长为 1 559.31 nm,在 1 531 nm 附近有一个明显的峰值,在此峰值右的平坦特性较好,其 3 dB 带宽可达 66.72 nm(从 1 533.12 nm 至 1 599.84 nm)。

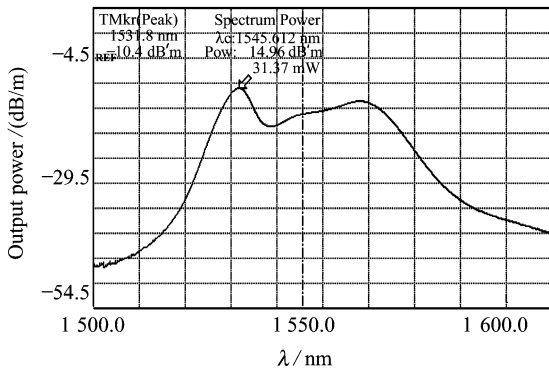


图 4 第 2 级 C 点测得的典型光谱

Fig. 4 Measured spectrum of second stage at point C

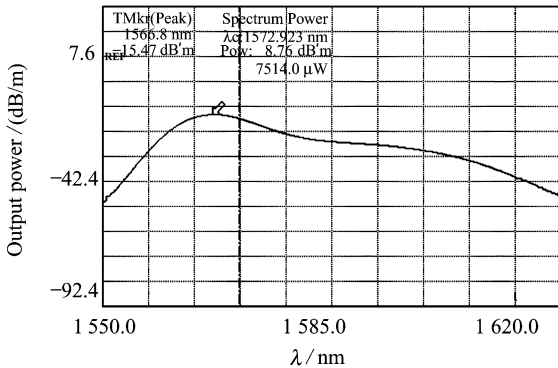


图 5 第 2 级 B 点测得的典型光谱

Fig. 5 Measured spectrum of second stage at point B

当以光纤环形镜为反射镜形成图 3 所示双级双程结构时,在实验研制过程中,采

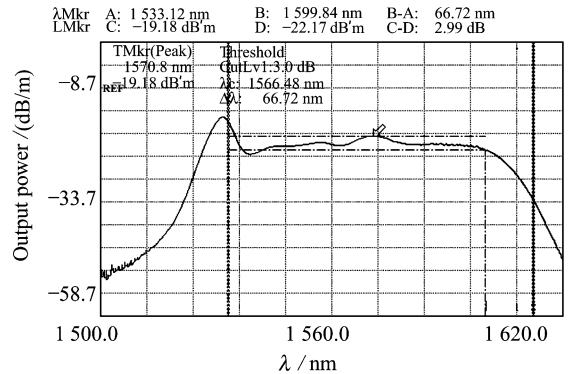


图 6 C+L 波段 ASE 输出谱

Fig. 6 Output ASE spectrum of C+L band in the experiment

当第 1 级分配抽运光功率增加时,光谱中 L-波段的光输出相对增加较快,输出光的平均波长向长波方向(L-波段)偏移,当第 2 级分配的抽运光功率增加时,使得 C-波段的相对光功率增加较快,平均波长向短波(C-波段)偏移,这 2 种情况都使得

光谱输出平坦度特性变差。只有当两级光功率都相应增加时,光谱的谱形基本呈整体向上平移趋势,输出功率增加,平均波长变化较小。

5 结 论

本文在分析了以普通宽带耦合器构成的光纤环形镜的反射与透射特性,进而采用3 dB耦合器制作近似100%反射镜后,以此为元件设计出双级双程C+L波段光源,其中采用一个980 nm的功率耦合器将抽运光源分配至两级中,分别采用掺铒浓

度不同的掺铒光纤作为增益介质,通过实验得到了功率为15.28 mW(11.84 dBm)的C+L波段ASE光输出,平均波长为1559.307 nm,在1531 nm附近有一个明显的峰值,在此峰值右的平坦特性较好,其3 dB带宽66.72 nm(从1533.12 nm至1599.84 nm)。在实验过程中,在平坦度相度相对要差一些的条件下,还通过调整两级抽运光的功率及分配比例得到了功率达到30.11 mW的超荧光输出。同时有待于通过减少各个连接处的损耗及改进实验来进一步提高系统的光转换效率,其试验和改进方案正在进展中。

参考文献:

- [1] 陈胜平,吕可诚,李乙钢,等. 大功率高效率掺铒超荧光光纤光源及其应用[J]. 光子学报,2004,33(1):17-20.
CHEN S P, LU K C, LI Y G, *et al.* High power, high efficiency erbium-doped superfluorescent fiber source and its applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(1):17-20. (in Chinese)
- [2] 钱景仁,陈登鹏,沈林放. 前向抽运双级双程掺铒光纤宽带光源[J]. 中国激光,2001,28(12):1075-1078.
QIAN J R, CHEN D P, SHEN L F, *et al.* Forward pumping dual-stage double-pass broadband erbium-doped fiber source[J]. *Chin. J. Laser*, 2001, 28(12):1075-1078. (in Chinese)
- [3] 沈林放,钱景仁. 高稳定宽频带掺铒光纤超荧光光源[J]. 光学学报,2001,21(3):300-304.
SHEN L F, QIAN J R. High stability and broad-band erbium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3):300-304. (in Chinese)
- [4] 蒙红云,高伟清,刘艳格,等. 基于光纤环形镜的L-波段掺铒光纤放大器增益的提高[J]. 中国激光,2004,31(7):825-828.
MENG H Y, GAO W Q, LIU Y G, *et al.* Gain enhancement of L-band erbium-doped fiber amplifiers based on fiber loop mirror[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, 31(7):825-828. (in Chinese)
- [5] 刘彬,孙军强. C波段和980 nm抽运的两段级联L波段掺铒光纤放大器[J]. 中国激光,2003,30(10):917-920.
LIU B, SUN J Q. Gain enhancement of two-stage L-band EDFA pumped by C-band and 980 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, 30(10):917-920. (in Chinese)
- [6] HUANG W C, M H, X J P, *et al.* High efficiency broad bandwidth erbium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(6): 311-313.
- [7] HARUN S W, TAMCHEK N, POOPALAN P, *et al.* Effect of injection of C-band amplified spontaneous emission on two-stage L-band erbium-doped fiber amplifier[J]. *Acta Physica Slovaca*, 2003, 53(2):173-17.
- [8] CHEN H, LEBLANC M, SCHINN G W. Gain enhanced L-band optical fiber amplifiers and

- tunable fiber lasers with erbium-doped fibers[J]. *Optics Communications*, 2003, 216:119-125.
- [9] TSAI S C, TSAI T C, LAW P C, *et al.* High-power flat L-band erbium-doped ASE source using dual forward-pumping scheme[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2003, 35:161-167.
- [10] ESPINDOLA R P, ALES G, PARK J, *et al.* 80 nm spectrally flattened, high power erbium amplified spontaneous emission fibre source[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(15):1263-1265.
- [11] LEE J H, RYU UC, PARK N. Passive Erbium-doped fiber seed photon generator for high-power Er³⁺-doped fluorescent sources with an 80nm bandwidth[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(5):279-281.
- [12] 黎敏, 田芋, 廖延彪. 飞速发展中的光纤陀螺技术[J]. *光学 精密工程*, 1998, 6(3):1-9.
LI M, TIAN Q, LIAO Y B. Development of fiber-optical Gyro technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(3):1-9. (in Chinese)
- [13] 张桂才, 杨清生, 林锡源, 等. 具有中等精度的全数字闭环保偏光纤陀螺仪[J]. *光学 精密工程*, 1998, 6(3):41-46.
ZHANG G C, YANG Q S, LIN X Y, *et al.* All-digital closed loop polarization maintaining fiber-optic gyro with medium precision[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(3): 41-46. (in Chinese)
- [14] WYSOCKI P F, DIGONNET M J F, KIM B Y, *et al.* Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications [J]. *Lightwave Technology*, 1994, 12(3): 550-567.
- [15] 何万迅, 施文康, 叶爱伦. 长周期光纤光栅及其在通信传感领域的新应用[J]. *光学 精密工程*, 2004, 9(2):1014-1018.
HE W X, SHI W K, YE A L. Long period fiber grating and its new applications in communication and sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 9(2):1014-1018. (in Chinese)

作者简介: 乔学光(1955—), 男, 陕西佳县人, 理学博士, 教授, 博士生导师。1982年毕业于西安交通大学物理系物理专业; 1998年3月, 在中国科学院西安光学精密机械研究所博士研究生毕业, 获光学博士学位; 1999年至2000年在美国麻省理工学院作访问学者。任西安市物理学会理事、陕西省科技期刊编辑学会理事长、中国物理学会会员、美国光学学会会员(OSA)、国际SPIE会员、陕西省教育管理研究会理事。乔学光教授主要从事纤维光学、光纤传感、光纤通信及光电子学等领域的教学与研究。长期担任大学物理、纤维光学、非线性光学、光电检测技术、光纤通信以及光纤传感等课程的教学工作。同时, 对光纤光栅作为各种光纤通信器件和传感器件, 做了大量的研究和应用开发工作。获国家“863”项目基金、国家自然科学基金、中国石油天然气集团公司中青年创新基金、国家教育部“十五”科技攻关项目基金, 以及陕西省西安市科技攻关项目基金等资助。曾多次获陕西省人民政府、陕西省教育厅优秀教学成果奖、中国石油天然气集团公司教育科研成果奖等奖励。共发表科研论文 50 余篇;

郭小东(1979—), 男, 西安石油大学电子工程学院在读硕士研究生, 研究方向为光纤通信与光纤传感技术。