

文章编号: 0258-7025(2004)05-0591-04

# 一种新颖的反射结构高功率超宽带光纤光源

高伟清, 蒙红云, 刘艳格, 张 昊, 袁树忠, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要** 报道了一种新型高功率超宽带光纤光源。利用 980 nm 激光二极管(LD)和 1480 nm LD 双向抽运掺铒光纤,经光纤环镜反射后,得到 C+L 波段自发辐射谱。通过调整 980 nm LD 和 1480 nm LD 的功率,在 1524.0~1600.6 nm(76.6 nm)范围内,自发辐射谱功率高于-18.8 dBm,并且在 1539.2~1600.6 nm(61.4 nm)范围内,自发辐射谱的平坦度为 2.8 dB。总荧光功率为 22.1 mW,转换效率为 18.8%。如果不加环境,并且保持相同的抽运条件,得到的放大自发辐射(ASE)谱宽在 1525~1565 nm 的 C 波段范围,其总的荧光功率为 7.1 mW,转换效率仅为 6%。通过分析加环境情况与不加环境情况下所得到的自发辐射谱,以及加环境情况下采用不同的抽运方式得到的自发辐射谱,最终得出结论,通过加环境,并且用 980 nm LD 和 1480 nm LD 双向抽运,得到了具有最佳效果的超宽带光纤光源。实验过程中通过调整 980 nm LD 和 1480 nm LD 的功率,曾得到 28.5 mW 的荧光功率,转换效率为 22.3%。

**关键词** 光电子学;超宽带光纤光源;掺铒光纤;光纤环镜

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A

## A Novel High Power and Ultra Bandwidth Superfluorescence Source with Reflected Structure

GAO Wei-qing, MENG Hong-yun, LIU Yan-ge,  
ZHANG Hao, YUAN Shu-zhong, DONG Xiao-yi

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

**Abstract** A novel structure high power and ultra bandwidth superfluorescence source is reported in this paper. With bi-directional pump of 980 nm LD and 1480 nm LD, C+L band ASE reflected by fiber loop mirror is got. By adjusting the power of LDs, 76.6 nm bandwidth from 1524.0 to 1600.6 nm is acquired where the ASE power is higher than -18.8 dBm, and from 1539.2 nm to 1600.6 nm (61.4 nm), the flatten of ASE is within 2.8 dB. The total ASE power is 22.1 mW and the power conversion rate is 18.8%. Without the fiber loop mirror, only C band ASE from 1525 to 1565 nm is got while the pump condition remains the same. The total ASE power is 7.1 mW and the power conversion rate is only 6%. From the experiment, the best ultra bandwidth superfluorescence source with the ASE power of 28.5 mW and the power conversion rate of 22.3% is acquired by adjusting the bi-directional pump power of LDs and using fiber loop mirror.

**Key words** optoelectronics; ultra bandwidth superfluorescence source; Er-doped fiber; fiber loop mirror

## 1 引 言

宽带光源在光纤陀螺(FOG)、掺铒光纤放大器(EDFA)的测量中得到了非常广泛的应用<sup>[1~3]</sup>。尤

其在航天惯性导航上应用的高精度光纤陀螺,对光源的特性有着非常高的要求,即它必须是宽频带、高功率、平均波长具有高稳定性,以及能与单模光纤有效地耦合。宽带光源可以降低由于瑞利后向散射、

收稿日期:2003-01-20;收到修改稿日期:2003-03-26

基金项目:天津市科委重点基金项目“013800411”资助课题。

作者简介:高伟清(1979—),男,安徽人,南开大学现代光学研究所在读硕士研究生,主要从事现代光通信和光电子方面的学习和研究工作。E-mail:weikin2002@163.com

偏振交叉耦合、克尔效应等引起的相干噪声；高功率光源可以提高光纤陀螺的测量灵敏度；波长稳定的光源可以提高光纤陀螺比例因子的稳定性。在掺铒光纤放大器的测试中，使用较小功率的宽带光源加 1550 nm 附近任意波长的激光器<sup>[4]</sup>，能够较简便地精确测量掺铒光纤放大器小信号增益谱，避免了使用价格昂贵的多波长扫描激光器。除此之外，宽带光源在光纤传感、光谱测试、低成本接入网以及波分复用网络等许多领域都得到了广泛的应用。

目前商用的宽带光源大多数为发光二极管(LED)和超发光二极管(SLED)，但是它们的寿命较短、波长稳定性差、输出功率低，并且由于空间相干性差，与单模光纤较难耦合，较大程度地限制了在各个领域的应用。光纤掺杂技术的日益成熟，以及半导体抽运激光器的快速发展，为人们提供了方便可靠的光纤光源。与发光二极管和超发光二极管相比，掺铒光纤中的放大自发辐射(ASE)具有温度稳定性好、荧光谱线宽、输出功率高、使用寿命长等优点，称之为宽带超荧光光纤光源(SFS)，具有广阔的应用前景<sup>[5,6]</sup>。

自从 1989 年提出用激光二极管(LD)抽运的掺铒光纤超荧光光源以来，人们对其进行了广泛的理论和实验研究。目前超荧光光纤光源已经被认为是最有潜力的宽带光源，多种超荧光光纤光源结构已经被相继提出并且得到研究。在这些结构中，单程后向结构由于结构简单并且不容易形成激光而被广泛应用。通过选取适当的掺铒光纤长度，光源的平均波长可以对抽运功率在很大范围内变化不敏感，但是这种结构的输出带宽相对较窄。近年来，由于抽运功率的高稳定性，双程后向结构也在实验上得到了实现。与单程结构相比，双程结构需要增加反射滤波器，但是利用这种结构能够得到更高的输出功率、更大的带宽和更好的波长稳定性<sup>[7]</sup>。另外，由于单程前向结构的光源在带宽较宽时输出功率很小，因而一般不被采用。

本文报道一种双向抽运双程结构的超宽带掺铒光纤超荧光光源，其主要优点是输出荧光功率高，具有超大的带宽和较高的转换效率。利用光纤环镜作反射器，既能提供很大的反射带宽，又能节约成本。

## 2 基本原理

图 1 所示为铒离子能级图。当掺铒光纤被抽运时，随着抽运功率的变化，掺铒光纤可能处于三种不

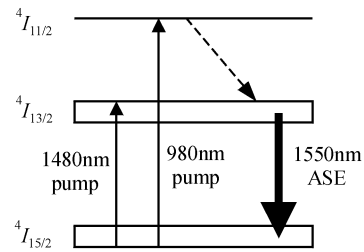


图 1 铒离子能级图

Fig. 1 Energy level diagram of Er<sup>3+</sup> ion

同的状态：

1) 当抽运功率较低时，上能级粒子数  $n_2$  小于基态粒子数  $n_1$ ，铒光纤中只存在自发辐射荧光。

2) 随着抽运功率的增加， $n_2$  逐渐增加，自发辐射的铒离子数逐渐增加，它们之间的相互作用也逐渐加强。当  $n_2 > n_1$  后，形成粒子数反转，在极强的相互作用下，铒离子发光的特性逐渐趋向一致，单个铒离子独立的自发辐射逐渐变为多个离子协调一致的受激辐射，所产生的辐射成为放大自发辐射。如果抽运足够强，在掺铒光纤特定方向上的放大自发辐射将大大加强，成为超荧光。

3) 若抽运很强，掺铒光纤中的辐射放大增益完全抵消了系统的损耗，这时候将形成自激振荡而产生激光(需要谐振腔)。

当铒光纤处于 2) 状态时，就可以制成超荧光光源。由于超荧光的产生是基于光纤中的放大自发辐射过程，因而具有输出功率高、温度稳定性好、相干性好和光谱线宽较宽等优点。

通常掺铒光纤的放大自发辐射谱的波长范围一般在 1530~1560 nm (C 波段)，对应于铒离子  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  的跃迁。1990 年，Massicott 等研究发现<sup>[8]</sup>，通过控制掺铒光纤的长度，使铒离子的粒子数分布反转稳定在较低的程度，可以使铒离子的放大自发辐射谱位移到 L 波段(1560~1620 nm)。这种位移的放大自发辐射谱对应于  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  跃迁的带尾，吸收和发射系数较小，但是较为平坦<sup>[9]</sup>。

由于低的粒子数分布反转和低的吸收、发射系数，要得到 L 波段的放大自发辐射谱需要的掺铒光纤比较长，约为同掺杂浓度下常规 C 波段的几倍<sup>[10]</sup>。这增大了光纤的吸收损耗和后向放大自发辐射的积累，降低了抽运转换效率。使用高掺杂、低损耗的掺铒光纤，可以减少所需光纤的长度，降低吸收损耗和后向放大自发辐射能量的积累，因此能够提高抽运效率。

所得到的放大自发辐射谱的性能与抽运源的选择有关,多数选用 980 nm 和 1480 nm 的半导体激光二极管。由于 1480 nm 的抽运源量子转换效率高,对得到 L 波段的放大自发辐射更有利,为了得到 C+L 波段的超宽带光源,使用了 980 nm 和 1480 nm 两种抽运源相结合的抽运方式,通过调节两种抽运源的功率,得到超宽带且平坦的放大自发辐射谱,且具有较高的功率。

### 3 实验与结果

实验装置如图 2 所示,采用 980 nm LD 和 1480 nm LD 相结合的双向抽运方式。980 nm LD 和 1480 nm LD 的最大输出功率分别为 150 mW 和 120 mW。实验中所用的光纤是两段各长 20 m 的掺铝共掺的商用掺铒光纤。第一段数值孔径为 0.23,截止波长为 904 nm,在 1200 nm 处的损耗为 3.5 dB/km,在 979 nm 和 1531 nm 处的吸收分别为 4.7 dB/m 和 5.6 dB/m;第二段为高掺杂光纤,数值孔径为 0.22,截止波长为 960 nm,在 1200 nm 处的损耗为 14.6 dB/km,在 979 nm 和 1531 nm 处的吸收分别为 15.2 dB/m 和 25.7 dB/m。波分复用器 WDM1 和 WDM2 的插入损耗分别为 0.5 dB 和 0.6 dB。光纤环镜 FLM 在 1520~1620 nm 的范围内都有大于 95% 的反射率,用来反射前向的自发辐射。输出端加隔离器,其插入损耗为 0.3 dB,实验结果由光谱仪和功率计测量。

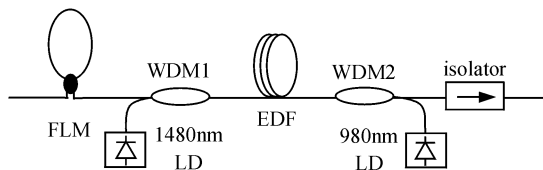


图 2 光纤环镜反射双向抽运实验装置图  
Fig. 2 Setup for bi-directional pump reflected by FLM

图 3 所示为加光纤环镜反射,利用 980 nm LD 和 1480 nm LD 双向抽运得到的放大自发辐射谱。总抽运功率为 117.5 mW,其中 980 nm LD 为 90.5 mW,1480 nm LD 为 27 mW。所得放大自发辐射谱在 1524.0~1600.6 nm(76.6 nm)范围内,自发辐射谱功率高于 -18.8 dBm,并且在 1539.2~1600.6 nm(61.4 nm)范围内,自发辐射谱的平坦度为 2.8 dB。用功率计测得总荧光功率为 22.1 mW,转换效率为 18.8%。图 4 为加光纤环镜反射,117.5 mW 的总抽运功率全部由 980 nm LD 提供得到的放大

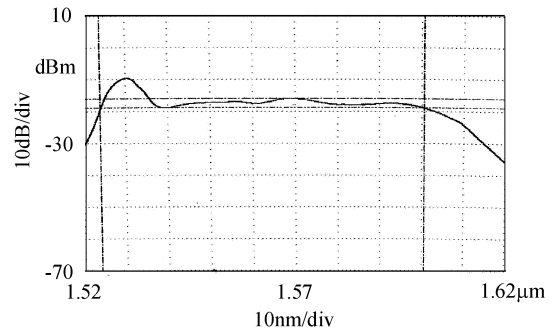


图 3 有光纤环镜双向抽运的 ASE 谱  
Fig. 3 ASE spectrum of bi-directional pump reflected by FLM

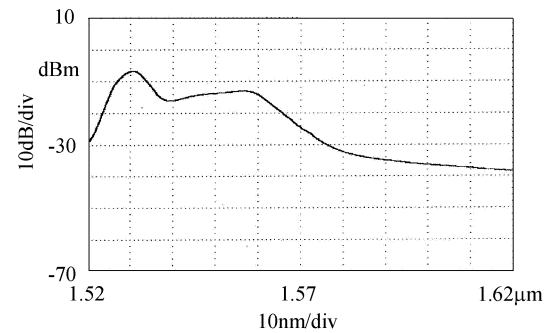


图 4 有光纤环镜全部 980 nm 抽运的 ASE 谱  
Fig. 4 ASE spectrum of 980 nm pump reflected by FLM

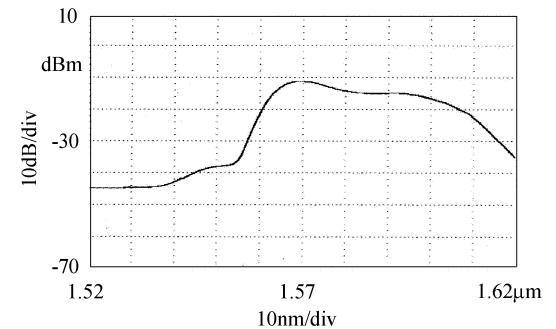


图 5 有光纤环镜全部 1480 nm 抽运的 ASE 谱  
Fig. 5 ASE spectrum of 1480 nm pump reflected by FLM

自发辐射谱,只有从 1525~1565 nm 的 C 波段带宽。图 5 所示为加光纤环镜反射,117.5 mW 的总抽运功率全部由 1480 nm LD 提供得到的放大自发辐射谱,只有从 1565~1610 nm 的 L 波段带宽。图 6 所示为不加光纤环镜,980 nm LD 和 1480 nm LD 双向抽运所得的放大自发辐射谱。抽运总功率仍为 117.5 mW(980 nm LD 为 90.5 mW,1480 nm LD 为 27 mW),放大自发辐射谱只有 1525~1565 nm

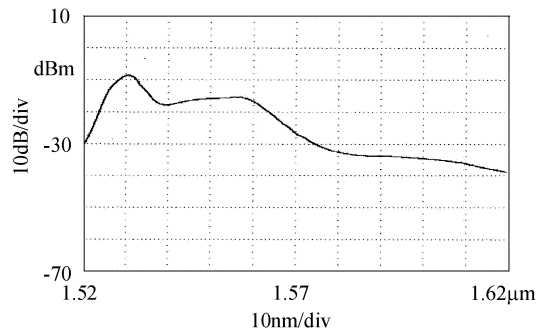


图 6 无光纤环境双向抽运的 ASE 谱

Fig. 6 ASE spectrum of bi-directional pump without FLM

的 C 波段带宽范围,其荧光功率为 7.1 mW,转换效率为 6%。

比较图 3~6 可以发现:1) 加光纤环境的情况下,由于反射前向的自发辐射谱,一方面可以增强在输出端得到 C 波段的放大自发辐射谱,另一方面也可以帮助抽运得到 L 波段放大自发辐射谱,因而能得到 C+L 波段的超宽带光纤光源,且具有较高的荧光功率和转换效率;不加光纤环境情况下,只得到了 C 波段的放大自发辐射谱,且荧光功率和转换效率都较低。2) 加光纤环境情况下,不同抽运方式的比较。全部用 980 nm LD 抽运,由于输出的是后向自发辐射,所以其波长范围在 C 波段;全部用 1480 nm 抽运,由于光纤吸收系数大且较长,所以自发辐射谱位移到 L 波段;采用 980 nm 和 1480 nm 两种抽运源配合使用,适当调整二者的功率,则得到 C+L 波段的超宽带光纤光源。

## 4 结 论

利用 980 nm LD 和 1480 nm LD 相结合的双向抽运方式,加上环境的反射,得到了高功率的超宽带光纤光源。通过分析加光纤环境情况与不加光纤环境情况下所得到的放大自发辐射谱,以及加环光纤环境情况下采用不同的抽运方式得到的放大自发辐射谱,最终得出结论,通过加光纤环境,并且用 90.5

mW 的 980 nm LD 加 27 mW 1480 nm LD 抽运,得到了具有最佳效果的超宽带光纤光源。其放大自发辐射带宽从 1524~1600.6 nm 共 76.6 nm,覆盖了通信窗口的 C+L 波段,总荧光功率为 22.1 mW,转换效率为 18.8%。实验过程中通过调整 980 nm LD 和 1480 nm LD 的功率(980 nm LD 为 102 mW, 1480 nm LD 为 26 mW),曾得到 28.5 mW 的荧光功率,转换效率为 22.3%。

## 参 考 文 献

- 1 Paul F. Wysocki, M. J. F. Dignonnet, B. Y. Kim *et al.*. Characteristics of erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(3):550~567
- 2 Douglas C. Hall, William K. Burns, Robert P. Moeller. High-stability Er<sup>3+</sup>-doped superfluorescent fiber sources [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7):1452~1460
- 3 Qian Jingren, Cheng Xu, Zhu Bing. The experimental research of a broadband erbium-doped fiber superfluorescence source [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(11):989~992  
钱景仁,程旭,朱冰. 掺铒光纤超荧光宽带光源的实验研究 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(11):989~992
- 4 Feng Jianhe, Ji Yuefeng, Guan Kejian. One method of accurate measurement of EDFA gain spectra [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5):543~545  
冯建和,纪越峰,管克俭. EDFA 增益谱的精确测量 [J]. *光子学报*, 2001, **30**(5):543~545
- 5 Yu You-long, Tam Hwa-yaw, Chung Weng-hong. Study on a novel broadband high power source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1):71~73  
余有龙,谭龙耀,鍾永康. 一种高功率宽带光源的研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(1):71~73
- 6 Shen Linfang, Qian Jingren. High-stability and broad-band erbium-doped superfluorescent fiber source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):300~304  
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
- 7 L. A. Wang, C. D. Chen. Stable and broadband Er-doped superfluorescent fibre sources using double-pass backward configuration [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(19):1815~1817
- 8 J. F. Massicott, J. R. Armitage, R. Wyatt *et al.*. High gain, broadband, 1.6  $\mu\text{m}$  Er<sup>3+</sup> doped silica fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(20):1645~1646
- 9 Hirotsuka Ono, Makoto Yamada, Terutoshi Kanamori *et al.*. 1.58  $\mu\text{m}$  band gain-flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):490~496
- 10 Felton A. Flood. L-band erbium-doped fiber amplifiers [C]. Proc. of OFC'2000, 2000, Paper WG1