

文章编号: 0258-7025(2005)06-0757-04

瓦级双包层光纤超荧光光源的实验研究

孔令峰^{1,2}, 楼祺洪¹, 周 军¹, 薛 冬¹, 董景星¹, 魏运荣¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

²中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 采用大功率半导体激光器抽运 25 m 掺 Yb 双包层光纤, 在单程装置中, 前向(SPF)和后向(SPB)分别获得了 1.46 W 和 1.82 W 最大超荧光功率, 斜度效率分别为 23.4% 和 29.2%, 3 dB 带宽最大为 11 nm。采用特定范围波长双色镜作为前腔镜, 形成双程前向(DPF)装置, 获得最大超荧光输出功率 2.12 W, 此时斜度效率为 43.2%, 中心波长在 1070 nm, 输出光谱平坦性较好, 3 dB 带宽从单程的 11 nm 提高到 42 nm。

关键词 激光技术; 双包层光纤; 超荧光; 双色镜

中图分类号 TN245 **文献标识码** A

Experimental Research on Watts Double Clad Fiber Superfluorescent Source

KONG Ling-feng^{1,2}, LOU Qi-hong¹, ZHOU Jun¹, XUE Dong¹,

DONG Jing-xing¹, WEI Yun-rong¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract The experimental results using two different configuration on high-power Yb-doped double-cladding fiber superfluorescent source (SFS) pumped by 975 nm laser diode are reported. In single-pass forward (SPF) and single-pass backward (SPB) design, the maximum superfluorescent output power is 1.46W and 1.82W, while the slope efficiency is 23.4% and 29.2% respectively. In double-pass forward (DPF) configuration using the dichroic mirror as the front cavity mirror, the maximum superfluorescent output power is 2.12 W with the slope efficiency of 43.2%. And central wavelength of superfluorescent spectrum is 1070 nm, the flatness of output SFS spectrum is greatly improved with the 3 dB bandwidth from 11 nm to 42 nm.

Key words laser technique; double clad fiber; superfluorescent; dichroic mirror

1 引 言

超荧光是激光与荧光之间的一种过渡状态, 是放大的自发辐射(ASE), 具有方向性好, 时间相干度低, 温度稳定性强, 荧光谱线宽等特点。在光纤陀螺中, 对光纤超荧光光源(SFS)一般要求带宽大于 10 nm, 平均波长稳定度达 10^{-6} 。在光学层析照相中, 对光纤超荧光光源一般要求功率大于 10 mW 并具有较好的高斯光谱特性。随着掺杂光纤制作工艺的日益成熟, 光纤超荧光光源比传统超辐射发光二极管(SLD)具有更好的温度稳定性和更大的输出功率, 还可通过不同掺杂粒子, 实现众多波段的超荧光光谱。

近年来, 由于采用了双包层光纤包层抽运技术,

超荧光光源的研究取得了很大进展, 在输出功率上从原来的几十毫瓦提高到数百毫瓦^[1~3]。本文报道了大功率双包层光纤超荧光光源, 得到较大功率输出, 输出光谱平坦性较好, 弥补了单程实验中超荧光光谱的平坦性较差的缺陷。

2 实验方法和结果

2.1 单程结构超荧光光源实验

实验装置如图 1(a)所示, 抽运源是中心波长约 975 nm 的 S300-975-0 型高功率激光二极管(LD), 最大输出功率可达 300 W, 掺 Yb 双包层光纤长度为 25 m, 纤芯直径为 30 μm , 数值孔径为 0.06, D 形

收稿日期: 2004-06-21; 收到修改稿日期: 2004-10-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程、国家自然科学基金(60244005)和上海市光科技专项(036105034)资助项目。

作者简介: 孔令峰(1979—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光纤激光器和放大器的研究。E-mail: lf_kong@siom.ac.cn

内包层尺寸为 $400/350 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.38, Yb^{3+} 掺杂浓度为 $5 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$, 双包层光纤入射端面作垂直抛光处理, 为抑制菲涅耳反射形成的激光振荡, 双包层光纤输出端由专用的光纤研磨机磨成 14° 倾角。由于在单程装置中, 存在单程后向 (SPB) 的超荧光输出, 在光路中加入隔离器来保护抽运源, 同时加 45° 双色镜将后向超荧光反射出来。 45° 双色镜对 $1060 \sim 1110 \text{ nm}$ 之间反射率在 90% 以上, 对波长在 975 nm 左右的抽运光有 95% 的透射。输出功率由 SJG-100A 功率计测得, 其测量范围为 $0 \sim 20 \text{ W}$, 分辨率为 0.01 W 。光谱输出特性曲线由 ANRITSU 光谱仪测量, 其测量范围为 $600 \sim 1700 \text{ nm}$, 最小波长分辨率为 0.1 nm 。在测试过程中, 由于超荧光功率较大, 在光路中加入可调衰减器来测量光谱。

激光二极管抽运光经过准直透镜、隔离器和聚焦透镜直接进入双包层光纤, 在聚焦透镜前加 45° 双色镜, 该装置可以同时测量前向 (SPF) 和后向的超荧光, 非球面聚焦透镜可把抽运光高效耦合到双包层光纤的内包层中, 耦合效率通过截断法测得在 90% 左右, 吸收的抽运功率可以通过测量进入的抽运功率和输出的抽运功率并计算得到。输出的超荧光功率和吸收的抽运光功率之间的关系如图 2 所示, 从图中可以看出, 在低的抽运功率下, 输出主要由自发辐射光组成, 输出功率增长缓慢, 随着抽运功率的不断增加, 输出功率得到了逐渐增长, 输出主要由放大的自发辐射即超荧光组成。当吸收的抽运功率为 17.6 W 左右时, 最大的前向超荧光输出功率为 1.46 W , 此时的斜度效率为 23.4%, 而通过双色镜反射的后向超荧光的最大输出功率为 1.82 W , 斜度效率为 29.2%。继续增大抽运功率, 在输出光谱中观测到了明显的尖峰, 如图 3, 表明在光纤中已

经产生了自激振荡, 开始有激光输出。不同的吸收抽运功率下的超荧光光谱如图 4, 5 所示, 可见 $1060 \sim 1110 \text{ nm}$ 之间的超荧光光谱强度远小于 $1040 \sim 1060 \text{ nm}$ 之间的光谱强度, 光谱的平坦性较差, 随着吸收抽运功率的不断增加, 3 dB 带宽有所增加, 但最大也仅达到 11 nm 。

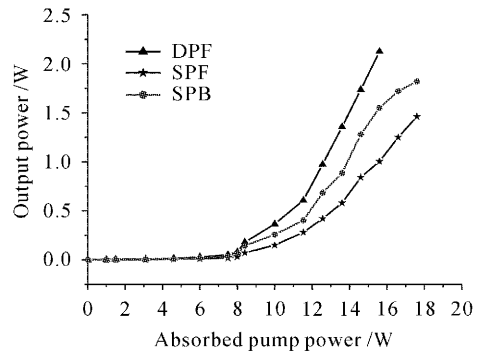


图 2 在单程前向、后向和双程前向装置下吸收抽运功率和输出功率示意图

Fig. 2 Output power against absorbed pump power for DPF, SPB and SPF SFS

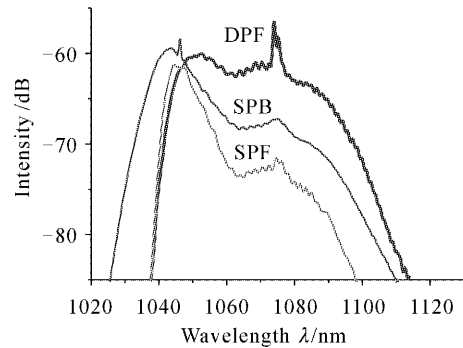


图 3 在单程前向、后向和双程前向装置下抽运功率升高到一定值后的光谱图

Fig. 3 Spectrogram when continue increasing pump power in SPF, SPB and DPF SFS

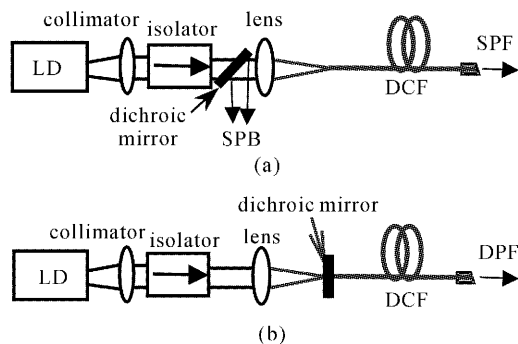


图 1 (a) 单程前向和后向, (b) 双程前向掺 Yb 光纤超荧光光源实验装置

Fig. 1 Experimental setup (a) SPF design and SPB design and (b) DPF design of Yb doped double-cladding fiber SFS

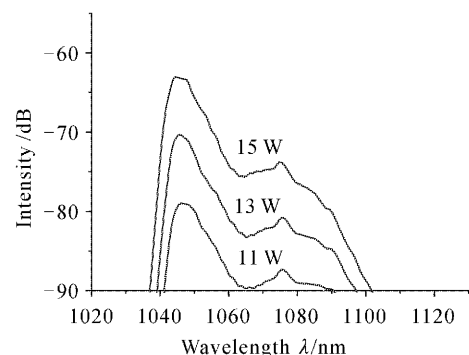


图 4 单程前向装置中随抽运功率的升高输出光谱的变化
Fig. 4 Output spectra of SPF SFS at different absorbed pump power

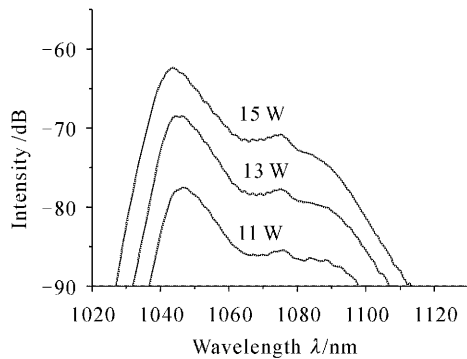


图5 单程后向装置中随抽运功率的升高输出光谱的变化
Fig. 5 Output spectra of SPB SFS at different absorbed pump power

2.2 双程结构超荧光光源实验

从单程实验看出,为获得平坦的输出光谱,需要增加波长较长区域的光谱强度^[4],在双包层光纤入射端面加上特定范围波长双色镜,构成双程装置,该双色镜对超荧光的输出光谱进行选择性的反射,单个波长的反射率可以根据要求镀膜确定。对在单程输出中荧光功率较低的波长采用较高的反射率,对输出荧光功率较高的波长采用较低的反射率。如果波长的反射率选择恰当,可以达到调整光谱形状的目的,不仅能增大输出功率,还能使输出光谱更为平坦,3 dB 带宽得到进一步提高。根据实验要求,在抽运光输入端加一块双色镜,其反射率随波长的变化如图 6 所示。对 975 nm 的抽运光有 95% 以上的透射率,对 1060~1110 nm 的超荧光有 90% 的反射率,这样对在单程实验中光谱强度较弱的波段进行了补偿,对 1060~1110 nm 波段构成了双程装置如图 1(b)。在不同的吸收抽运功率下的输出光谱如图 7 所示,可以看出输出光谱的平坦性较好,3 dB 带宽有了很大提高,最大可达 42 nm。在吸收的抽运功率为 15.6 W 时,最大输出超荧光功率为

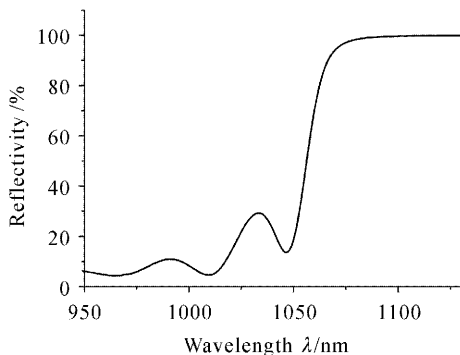


图6 作为前腔镜的双色片的反射率曲线
Fig. 6 Profile of reflectivity of dichroic mirror as the front cavity mirror

2.12 W,如图 2 所示,此时的斜度效率为 43.2%。继续增加抽运功率,会有激光振荡产生,如图 3,激光波长从原来的 1050 nm 移到 1080 nm,双色镜的反射起了决定作用。

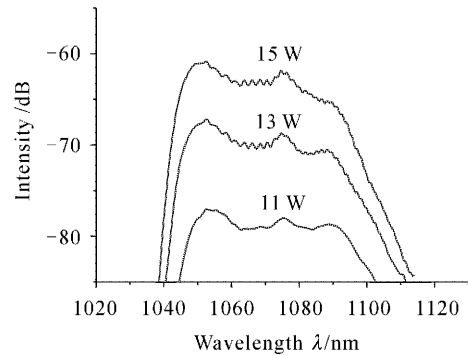


图7 双程前向装置中随抽运功率的升高输出光谱的变化
Fig. 7 Output spectra of DPF SFS at different absorbed pump power

3 结果分析

对比两实验装置中在不同吸收抽运功率下的超荧光光谱,可以看出,3 dB 带宽随着吸收抽运功率的增加而变宽。通常情况下,在低输出功率时,由于增益窄化,超荧光的 3 dB 带宽随着抽运功率的增大而变窄,而在高功率时却有变宽的趋势,这是由于 Yb^{3+} 跃迁的非均匀加宽和增益饱和引起的,实际的光谱分布和光纤的长度、抽运光的波长和抽运功率有关。在实验中,随着抽运功率的增大,光谱分布同时向长波和短波两个方向偏移。在相同的抽运功率下,后向超荧光比前向超荧光向短波偏移的幅度大,这是因为超荧光的短波长部分是由 Yb^{3+} 的准三能级跃迁引起的,通常在强抽运即高粒子数反转时产生,而长波辐射与准四能级跃迁有关。后向超荧光在抽运光入射端输出,此处的抽运光很强,粒子数反转较高,在光纤中传输的距离短,更易于产生短波辐射。比较图 4 和图 5,后向超荧光谱比前向超荧光谱平坦度要好,平均波长稳定性要强,同时可避免光反馈引起的附加噪声。对于后向超荧光平均波长与抽运功率的关系,也已经有详细的理论分析^[5],结果表明两者间的关系与光纤长度有关,如果光纤长度合适,平均波长将与抽运功率无关,稳定性非常好。从图 2 可以看出,在相同的抽运功率下,后向实验中的超荧光功率比前向实验的超荧光功率要高得多。原因是前向超荧光在光纤末端抽运强度较弱的地方重新被吸收,而后向超荧光在传输过程中不断被

放大。

在双程前向实验中,由于双色镜对 1060 ~ 1110 nm 波段超荧光的高反射,使得这一波段的光谱强度有所提高,改善了整个光谱的平坦性。如果更为细致地优化双色镜在这一波段各波长的反射率,就可以得到更加平坦的光谱输出。双程前向包含了前向和后向两个方向的超荧光,所以具有更高的输出功率和转换效率。为从理论上研究双程前向超荧光输出功率与抽运光功率之间的关系,可以参考 Digonnet^[6]的光纤超荧光输出特性理论,采用近似的条件,即假设光纤入射端双色镜对超荧光的反射率为 100%,光纤输出端的反射率为零时,光纤输出端的超荧光功率 $p^+(l)$ 与光纤入射端的抽运光功率 p_p 的关系有如下等式

$$p^+(l) = p_0 \exp \left\{ \frac{2[p_s k(l) p_p - p^+(l)]}{p_s - 2p_0} - 1 \right\}, \quad (1)$$

其中 $k(l)$ 为与光纤长度有关的常数, p_0 为描述自发辐射的常数, l 为光纤的长度, p_s 为饱和功率常数,这一理论和实验结果吻合得很好^[3]。也是由于双色镜的作用,双程前向装置产生激光振荡的阈值比前向或后向产生激光的阈值要小。自激振荡的阈值与光纤的长度等参数和不同装置引起的不同反馈有关,除了聚焦透镜等端面引起的反射外,光纤中的受激布里渊背向散射是形成激光振荡的主要原因^[6],不同装置中,光纤增益分布不均匀所引起的受激布里渊背向散射的大小不同,导致产生激光的阈值有所差异,所以说从根本上不能避免激光的产生。自激振荡的出现,破坏了超荧光谱的平坦性,对超荧光光源的应用产生不利影响。另外,在吸收的抽运功率较低的时候,超荧光的转换效率与其他的实验报道^[7]相比偏低。分析其原因,可能是光纤太长,本底吸收损耗太大,另外,也可能是光纤的吸收谱峰值与 975 nm 有些偏离^[8,9]。关于这些问题,将做进一步的研究。

4 结 论

在单程前向和单程后向装置中分别获得 1.46 W 和 1.82 W 双包层光纤超荧光输出,3 dB 带宽最大为 11 nm。为提高输出功率和 3 dB 带宽,采用有特定波段范围反射率的双色镜作为前腔镜,构成双程前向装置,不仅把最大输出功率提高到 2.12 W,还把最大 3 dB 带宽提高到 42 nm,为双包层光纤超荧光光源在诸多领域的应用奠定了基础。若用波分复用器和宽带光纤光栅代替双色镜,可使器件结构紧凑,更具实用性,这是下一步工作的重点。

参 考 文 献

- 1 I. N. Duling III, W. K. Burns, L. Goldberg. High power superfluorescent fiber source [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(1): 33~35
- 2 L. Goldberg, J. P. Koplow, R. P. Moeller *et al.*. High power superfluorescent source with a side-pumped Yb-doped double cladding fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13): 1037~1039
- 3 Li Yigang, Liu Weiwei, Fu Chengpeng *et al.*. High power Yb-doped double cladding fiber broadband superfluorescent source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1171~1173
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 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1171~1173
- 4 S. V. Chernikov, J. R. Taylor, V. P. Gapontsev *et al.*. A 75 nm, 30 mW superfluorescent ytterbium fiber source operating around 1.06 μm [C]. *CLEO*, 1997, **CTuG8**: 83~84
- 5 D. C. Hall, W. K. Burns. Wavelength stability optimisation in Er³⁺-doped superfluorescent fibre sources [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(8): 653~654
- 6 Michel J. F. Digonnet. Theory of superfluorescent fiber lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(11): 1631~1639
- 7 M. Bashkansky, M. D. Duncan, L. Goldberg *et al.*. Characteristics of a Yb-doped superfluorescent fiber source for use in optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(8): 305~310
- 8 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. 10 watts double-cladding fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1080~1083
楼祺洪,周 军,朱健强等. 10 瓦级双包层光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1080~1083
- 9 Q. H. Lou, J. Zhou, Z. J. Wang *et al.*. Wavelength characteristics of Yb³⁺-doped double-cladding fiber laser [C]. *SPIE*, 2003, **4974**: 244~249