

1053nm 附近掺镱光纤超荧光光源的研究^{*}

乔启全 陈 柏 范 微 陈嘉琳 李学春 林尊琪

(高功率激光物理国家实验室,中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

(2002 年 7 月 9 日收到 2002 年 9 月 18 日收到修改稿)

在理论分析的基础上,提出并实现了利用两个光纤光栅串联结构构成的平坦性较好,特定波段荧光功率输出较大的超荧光光源,并和光纤反射圈结构和没有反射装置的结构作了比较.实验利用了 1052.54—1053.42nm 的反射率为 29.6dB 和 1052.624—1055.60nm 的反射率为 34.4dB 的两个宽带光纤光栅得到了 1052.5—1055.5nm 波段的 3nm 宽的比其他波段要高 12dB 的超荧光.

关键词:串联宽带光纤光栅,超荧光光源,掺 Yb^{3+} 光纤,光纤反射圈

PACC:4272

1. 引言

宽带连续超荧光或准连续超荧光光源在诸如传感器、光谱术和 OCT 成像领域的应用非常广泛.掺稀土单模硅光纤具有如下优点:放大自发辐射具有很好的光谱稳定性,谱宽可达几十至上百纳米,增益可达到 1dB/1mW,在一个典型的增益要求 30—40 dB 或双通系统的单通增益为 15—20 dB 的超荧光系统中,抽运源可以采用激光二级管(LD)^[1];采用光纤结构可以使超荧光输出高效、方便的耦合到其他光纤中.因此,掺稀土单模硅光纤超荧光是一种很好的宽带单模模光纤超荧光光源.

在 980nm 的抽运下,锗硅光纤中的镱离子具有从 1—1.15 μm 宽达 150nm 的荧光发射谱^[2].近年来,掺镱超荧光光源的研究取得了很大的发展. Yb^{3+} 的光谱特性与高激发能级的跃迁特性得到了深入的研究^[3,4].这种掺杂光纤超荧光由于阈值较低,输出功率较大可能会取代 1060nm 的掺钕超荧光.最近,高功率双包层掺镱光纤超荧光已有所报道^[5].

掺稀土光纤超荧光光源的结构可以采用正向结构、反向结构、双通结构和光纤放大结构^[6].其中双通结构具有增益大、阈值低,对抽运功率和光纤长度的要求较低的优势.文献[7]报道了利用光纤反射圈构成的前向抽运的双级双程掺镱光纤超荧光宽带光

源.在双通结构中所用的关键元件是反射器件.目前超荧光光源的制作中采用的反射器件主要是镀膜反射镜和光纤反射圈,镀膜反射镜的耦合损耗大,不利于制作功率大的超荧光;光纤反射圈的插入损耗也较大,且在不同的波段反射率差别较大,很难制作出平坦性好的超荧光.本文提出的多级宽带光纤光栅串联结构具有以下优点:宽带光纤光栅的反射率很高(30dB 左右以上),直接在光纤上刻光栅,可以避免熔接损耗;反射率不同的宽带光纤光栅补偿 Yb^{3+} 离子自发发射谱线不平坦导致的宽带超荧光光源谱线的不平坦,提高特定波段荧光功率的输出.

2. 理论分析

Yb^{3+} 的能级结构如图 1 所示.基态 $^2F_{7/2}$ 实际上有四个 Stark 分量,在室温下只有 a, b, c 三个位置有发射谱线产生.激发态 $^2F_{5/2}$ 也有多个 Stark 分量,其中 d, e 分量对应 975nm 和 915nm 的吸收峰.在 980nm 的抽运下,对应 $d \rightarrow c, b$ 的跃迁为准四能级跃迁,产生波长 1010—1162nm 的荧光输出.对于四能级系统的光纤超荧光结构,假定为均匀加宽,且抽运光与信号光的模场有效面积的差异可以忽略时,可以采用下面的公式进行研究.为了描述超荧光(SFS)的光谱行为,需要将其光谱看成 n 个相邻的频率是 ν_i ,带宽为 $\delta\nu_i$ 的部分构成.设 $P_s^+(z, \nu_i)$ 为

^{*} 国家高技术 863-804 资助的课题.

在 z 处频率在 $(\nu_i, \nu_i + \delta\nu_i)$ 范围内前向和反向的放大自发辐射(ASE)输出功率,“+”代表前向,“-”代表反向。 $P_p(z)$ 为在 z 处的抽运功率。 $P_s^\pm(z, \nu_i)$, $P_p(z)$ 可以通过解下列一阶微分方程得到^[4]:

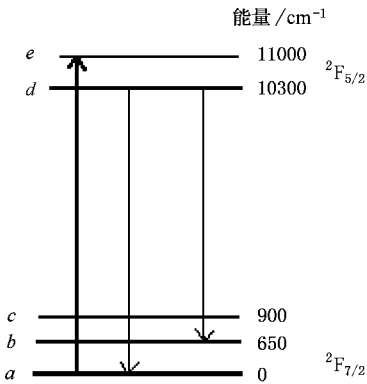


图 1 硅中镱离子的能级图

$$\frac{dP_s^\pm(z, \nu_i)}{dz} = \pm \gamma_s(z, \nu_i) P_s^\pm(z, \nu_i) \pm \gamma_{se}(z, \nu_i) 2h\nu_i \delta\nu_i, \quad (1)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z) P_p(z), \quad (2)$$

式中 $\gamma_s(z, \nu_i)$ 和 $\gamma_{se}(z, \nu_i)$ 表示在 z 处频率为 ν_i 的信号光的增益系数。 $\gamma_p(z)$ 为抽运光在 z 处的吸收系数。 Yb^{3+} 能级结构中 $2F_{5/2}$ 上面不再有能级,且 ASE 发射在 1053nm 附近为四能级系统,所以没有信号光的基态吸收和抽运光的激发态吸收。信号光增益系数和抽运光的吸收系数可以用激发态和基态的粒子数密度 $N_2(z)$ 和 $N_1(z)$ 表示,即

$$\gamma_s(z, \nu_i) = \sigma_e(\nu_i) N_2(z) - \sigma_a(\nu_i) N_{ab}(z), \quad (3)$$

$$\gamma_{se}(z, \nu_i) = \sigma_e(\nu_i) N_2(z), \quad (4)$$

$$\gamma_p(z) = \sigma_a(\nu_p) N_1(z) - \sigma_e(\nu_p) N_2(z) + \sigma_{pa}(\nu_p) N_{ab}(z). \quad (5)$$

如果浓度淬灭消耗的抽运光或信号光可以忽略,则(3)(5)式右边最后一项为 0。

如果用耦合损耗小的反射装置收集 SFS 的某端口超荧光(如 WDM 的输出端)构成双通系统,则另一端的荧光输出应是前向和反向输出功率之和,即 $P_s(z, \nu_i) = P_s^+(z, \nu_i) + P_s^-(z, \nu_i)$ 。因为光纤的散射损耗很小,且前向与反向 ASE 超荧光增益相同,所以前向和反向荧光输出相同,即 $P_s^+(z, \nu_i) = P_s^-(z, \nu_i)$ 。如果反射装置具有波长选择性,只对某特定波段的波长进行收集,则此特定波段的荧光输

出将会成倍加强。为了提高需要的 1053nm 附近的超荧光,实验中我们分别采用串联宽带光纤光栅、光纤反射圈和不用反射装置进行了实验,并作了比较,发现串联宽带光纤光栅具有很大的优势。

3. 实验装置与过程

图 2 是宽带光纤光栅结构超荧光光源装置图,将宽带光纤光栅去掉或换成光纤反射圈就构成不采用反射装置结构和采用光纤反射圈结构的超荧光装置。抽运源采用输出波长为 975nm 的带光纤光栅尾纤半导体激光器,抽运功率经 980/1053nm 波分复用器(WDM)耦合进掺 Yb^{3+} 光纤,掺 Yb^{3+} 光纤长 21m,掺杂浓度为 700ppm;掺 Yb^{3+} 光纤后接上光隔离器(isolator),波分复用器中与 LD 一侧的另一臂分别接上光纤反射圈(ring reflector)或串联宽带光纤光栅(FBG1 和 FBG2 构成);其透射光谱图分别如图 3、图 4 和图 5 所示;输出的超荧光光源用光谱分析仪观察,输出荧光功率用功率计测量。

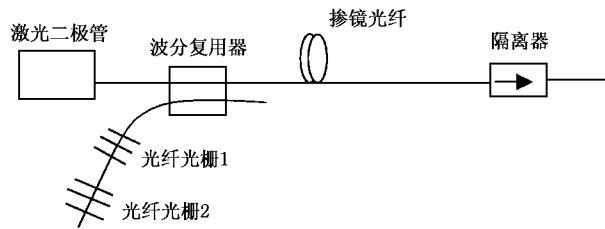


图 2 由宽带光纤光栅 FBG1 和 FBG2 构成的掺镜超荧光光源

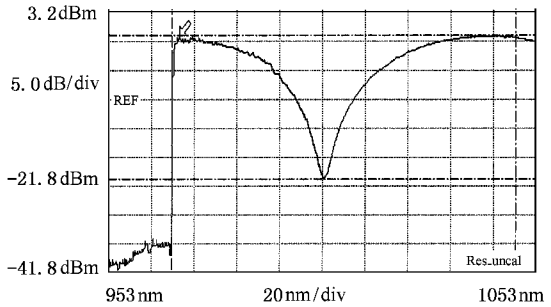


图 3 光纤反射圈的透射光谱

实验分别用光谱仪测量了串联宽带光纤光栅、光纤反射圈及没有反射装置的结构构成的宽带超荧光光源装置的荧光光谱特性,并分别用功率计测量了荧光功率。为防止出现激光振荡,在光路中加入了隔离器,隔离器的损耗较大(约 1—2dB),所以功率

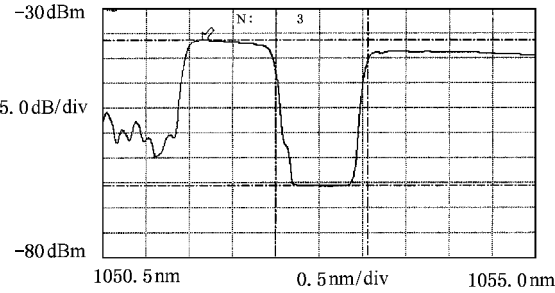


图 4 宽带光栅 FBG1 的透射光谱

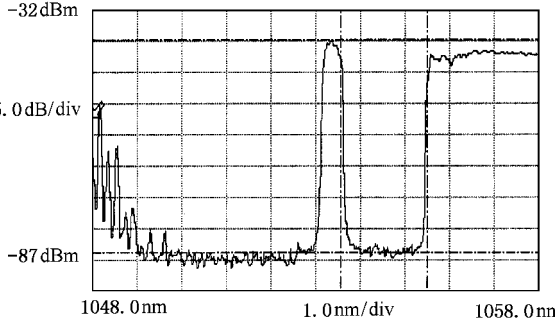


图 5 宽带光栅 FBG2 的透射光谱

计测得的荧光输出功率会损失一些.实验绘出了三种结构在 1053nm 附近、峰值附近荧光光谱功率输出随抽运功率变化的曲线.

图 6 所示为三种结构分别在 1053nm 附近处荧光功率输出(dBm)随抽运变化的关系.图 6 表明,1053nm 处荧光输出功率(dBm)宽带光纤光栅最高,光纤圈其次,没有反射装置最低,因为光栅反射率(30dB 左右,3nm 反射带宽)最高且插入损耗小,光纤圈反射率只在 1053nm 波长处为 25dB,并向两边递减,且插入损耗较大,单通没有反射.

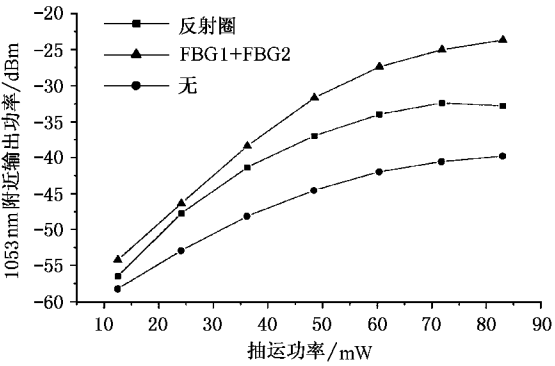


图 6 1053nm 附近荧光输出功率(dBm)与抽运功率的关系

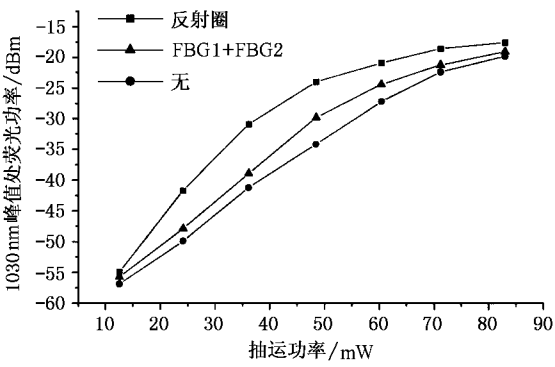


图 7 1030nm 峰值处荧光功率(dBm)与抽运功率的关系

图 7 所示为它们分别在峰值处荧光功率输出(dBm)随抽运变化的关系.图 7 显示,在超荧光峰值处荧光功率输出光纤反射圈结构最大,宽带光纤光栅其次且与没有反射结构较为接近. Yb^{3+} 在 1030nm 附近具有最大的发射截面,因而其发射谱在此波长附近出现峰值,导致掺镱超荧光光源的荧光峰值也在此出现.实验中我们感兴趣的波段在 1053nm 位置,希望在此位置有较大的荧光输出.如果 1030nm 波长出现较大的荧光峰值,势必占用大量的反转粒子数,不利于 1053nm 波长荧光功率的提高.这要求反射器件在 1030nm 波长没有反射或反射率很小,而在 1053nm 波长有尽可能高的反射率.上述三种结构中,只有串联宽带光纤光栅满足要求,因为它在 1030nm 波长没有反射,在 1053nm 波长有 30dB 左右反射率,反射带宽为 3nm.光纤圈在此处的反射率有 7dB,因此光纤圈对峰值功率的抑制没有宽带光栅好.

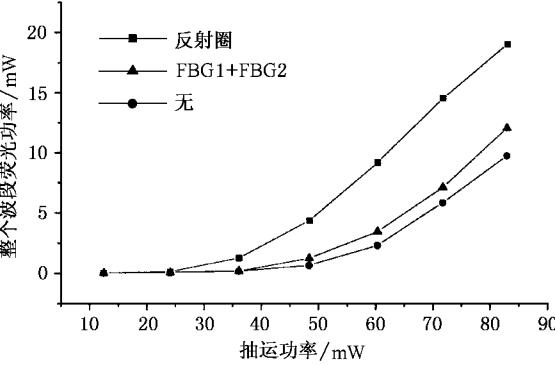


图 8 整个波段荧光功率(mW)输出与抽运功率的关系

图 8 所示为整个波段的荧光功率输出(mW)特性.整个波段的荧光输出随抽运功率增加时,光纤反射圈结构中荧光输出功率总是最大,组合宽带光纤

光栅的荧光输出功率比单通结构稍大一些,如图5所示.因为光纤反射圈的反射带宽较宽,反射率大于90%的带宽至少有40nm(图3,从1033nm到1073nm),组合宽带光纤光栅的反射带宽仅为3nm,由图4和图5的宽带光栅串联组成(经测量,图5的宽带光栅的左半部分约5nm带宽为损耗而不是反射),单通没有反射,因而组合宽带光栅与单通都较低,组合宽带光栅稍高一些.

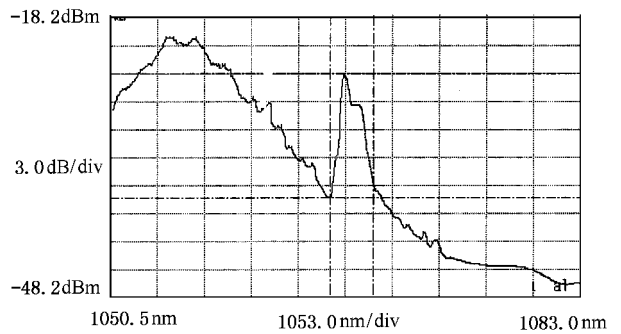


图9 FBG1与FBG2串联构成的掺镜超荧光光源在1023—1086nm波段的光谱

使用宽带光纤光栅还有一个优点,可以在整个荧光谱线中提高特定波段的荧光谱线高度和功率输出(如图9),1052.5—1055.5nm波段的3nm宽的比其他波段要高12dB.使用光纤圈并不能使1053nm处超荧光高出临近其他波段的荧光输出(图10),其光谱与单通结构相似.

将光谱仪的span设为5nm时,可以清楚地看到1053nm波长附近荧光被提高的情况(图11).在图11所示的被提高的1052.5—1055.5nm波段,FBG2起作用的右半部分荧光输出比FBG1低,有两个原因可以解释:一是FBG2接在FBG1后面,损耗比FBG1大,二是FBG2对应长波,FBG1对应短波,短波比长波的发射截面大.如果采用反射率比FBG2低的FBG1就可以使3nm范围内荧光平坦.因为实验

室没有更长或更短反射波长的宽带光栅,所以不能实现更宽带宽内荧光谱线和功率提高的平坦的超荧光.从实验结果,用组合宽带光纤光栅可以实现某特定波段的荧光谱线和功率的提高,通过选择不同的反射率,还可以实现荧光的输出谱线平坦化.

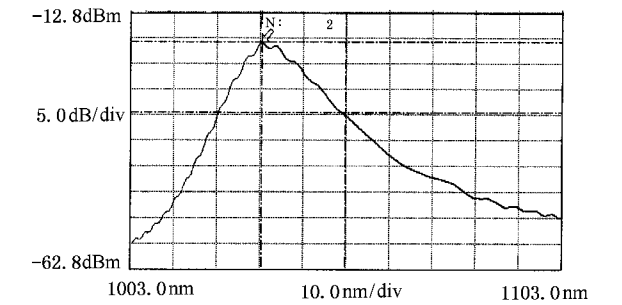


图10 光纤反射圈结构的超荧光光源的输出光谱

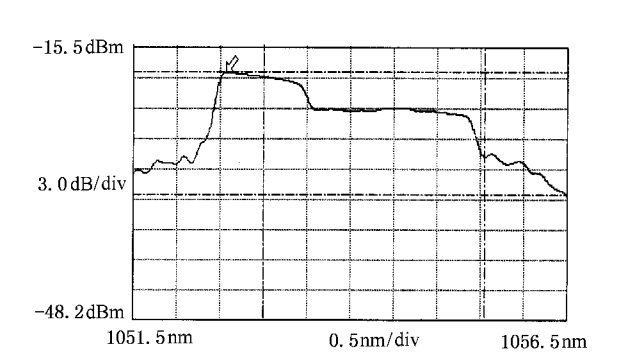


图11 FBG1和FBG2串联构成的掺镜超荧光光源在1053.5—1056.5nm波段的光谱

4. 结 论

为了提高掺镜光纤超荧光在1053nm波段附近的荧光输出,本文提出了采用串联宽带光纤光栅结构并取得了满意的结果,实验表明串联宽带光纤比光纤反射圈结构有很大的优越性.

[1] Hanna D C , Perry I R , Sunni P J , Townsend J E and Tropper A C 1989 *Opt. Commun.* **72** 230

[2] Chemikov S V , Taylor J R , Gapontsev V P , Bouma B E and Fujimoto J G 1997 *Proceedings on Conference on Laser and Electro-Optics CLEO '97* **11** 83

[3] Zhang L *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1378 [张龙等 2001 物理学报 **50** 1378]

[4] Fang D W *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 596 [方达渭等 1999 物理学报 **48** 596]

[5] Goldberg L , Koplow J P , Moeller R P and Kliner D A V 1998 *Opt. Lett.* **23** 1037

[6] Wysocky P F , Digonet M J F , Kim B Y and Shaw H J 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 550

[7] Qian Jingren , Chen Dengpeng , Shen Linfang and Yu Benli 2001 *Chinese Journal of Lasers A* **28** 1075

Investigation of Yb^{3+} -doped superfluorescent fibre sources around 1053nm *

Qiao Qi-Quan Chen Bai Fan Wei Chen Jia-Lin Li Xue-Chun Lin Zun-Qi

(*National Laboratory on High Power Laser and Physics* ,

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

(Received 9 July 2002 ; revised manuscript received 18 September 2002)

Abstract

Based on theory analysis , we have demonstrated experimentally how to use cascaded wideband fibre Bragg gratings (FBGs) as reflectors in the superfluorescent fibre sources (SFS) configuration . In the experiment , we investigated the output characteristics of the set-up with cascaded wideband FBGs , and compared it with those of the set-up with fibre ring reflector or without any reflector . From what we have achieved in the experiment , we find that the cascaded wideband FBGs is promising to be used as reflectors in SFS .

Keywords : cascaded wideband FBGs , superfluorescent fibre sources , Yb^{3+} -doped fibre , ring reflector

PACC : 4272

* Project supported by National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-804).