

800 nm 激光泵浦掺 Nd³⁺ 的氟化物玻璃光纤 正向双程超荧光分析

王 劲 祁长鸿 吴铁强 沈红卫 于福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 从实验上探讨了掺 Nd³⁺ 的氟化物玻璃光纤正向双程超荧光基本特性, 包括输入-输出特性、输出-带宽特性以及输出-波长(激发)特性。并给出了理论上的拟合公式。实验表明利用氟化物玻璃光纤有望获得性能优异的有应用前景的低相干度集成化光源。

关键词 氟化物玻璃光纤, Nd³⁺ 的超荧光。

1 引 言

在众多的光纤探测器中需用相干度低的光源, 超荧光具有方向性好、功率大、相干度低的特点, 因而在光纤陀螺仪^[1]、信号处理等系统^[2]中有广泛的应用。目前实际应用的多为半导体超荧光光源。掺杂光纤的日益成熟, 为人们提供了一种方便、可靠的超荧光光源。与半导体管相比较, 它具有更好的温度稳定性, 较宽的谱带和大的输出功率, 而且通过掺杂不同的发光粒子, 可以很方便地获得众多波段的超荧光光谱。Nd³⁺ [3, 4]、Er³⁺ [5, 6] 和 Pr³⁺ [7] 等掺杂的石英光纤超荧光现象已被广泛地探讨过。氟化物玻璃是一种良好的光学基质材料, 其光学光谱透过范围大、透过率高, 而且最高声子能量低于氧化物玻璃, 因而荧光效率要比在氧化物玻璃中高得多。另外, 在重金属氟化特玻璃中, 可以获得极高的掺杂浓度。适当高的掺杂浓度可以用较短的光纤获得较高的输出功率。800~980 nm 波段泵浦光纤具有良好的实际应用前景。这个波段的半导体激光在各方面较为成熟。本文报道钛宝石激光器激发国产 Nd³⁺ 离子掺杂的氟化物玻璃光纤, 获得了 1047 nm 的超荧光, 并研究了超荧光基本特性。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。泵浦源是 Ar 离子激光器泵浦的钛宝石激光器, 波长为 794 nm, 位于 Nd³⁺ 的 ⁴F_{3/2} 能级的吸收峰值处。泵浦光由一消色差的显微物镜耦合进光纤芯径。物镜的放大倍数为 10×, 数值孔径为 0.3。图中的反射镜为一平行平面镀膜片, 在 1.0~1.1 μm 范围内全反, 对 0.8 μm 的泵浦光高透。将光纤端面紧贴于膜片, 构成双程装置。整个耦合系统的耦合效率约为 10%。荧光测量系统由 WDG30 型光栅单色仪(光栅 600 线, 闪耀波长 750 nm)和 GDB-411 型光电倍增管组成, 输出信号在 x-y 记录仪上绘出。用锗探测器测荧光信

号,并用数字电压表显示。该系统在 1.05 μm 附近的功率-电压换算系数为 2.75 mV/mW。实验中未加滤光片滤除 Nd³⁺ 在 1.3 μm 的荧光,一方面是因为探测器对 1.3 μm 的响应为 12.5 mV/mW;另一方面, Nd³⁺ 在 1.3 μm 处的自发辐射强度远比 1.05 μm 的弱(分支比分别为 50%和 10%),因此在测量 1.05 μm 的超荧光功率时,可认为 1.3 μm 的荧光影响不大。根据以上参数估算,由此引入的系统误差不超过 4.5%。为消除残余泵浦光和 Nd³⁺ 在 880 nm 的发光,在锗探测器前加了一块 900 nm 起步的滤光片,它在 1.05 μm 处的透过率为 50%。光纤的基质是 ZBLAN 玻璃,掺杂浓度为 0.1 mol%,光纤芯径 10 μm ,芯-皮层折射率差 0.003。实验所用光纤长 1.2 m。

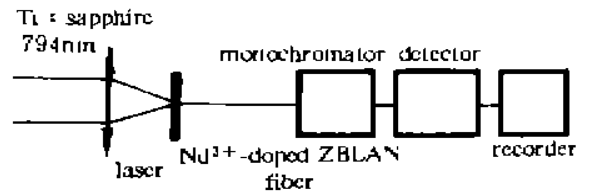


Fig. 1 The experimental setup for forward double-pass superfluorescence

3 超荧光特性

3.1 超荧光的输入-输出功率特性

图 2 为双程超荧光的输入-输出功率特性。通过对数据的拟合发现,对于双程超荧光,当泵浦功率低于 60 mW 时,输入-输出基本上呈线性关系,而且输出极低,这说明在这个区域,光纤的发射主要是以自发辐射为主。随着泵浦功率的增加,发射强度迅速增加,输入-输出开始偏离线性关系。当泵浦功率高于 140 mW 时,荧光的输入-输出又呈现线性,说明已进入了增益饱和阶段。此时荧光的斜率效率为 47%,最高输出功率约为 8 mW。从整个发展过程来看,超荧光现象不存在类似于激光那样的突变性阈值,而是逐渐变化的。若以该直线的外推点作为超荧光的阈值,求得该阈值 \sim 124 mW。根据[8]的阈值定义,求得双程超荧光的阈值 \sim 150 mW,二者基本相同。

图 3 是根据实验求得的光纤的单程增益^[9]随泵浦功率的变化。从该图中可以直接看到,当泵浦功率达到 150 mW 时,增益明显地开始偏离线性,也即表明光纤的增益饱和了。

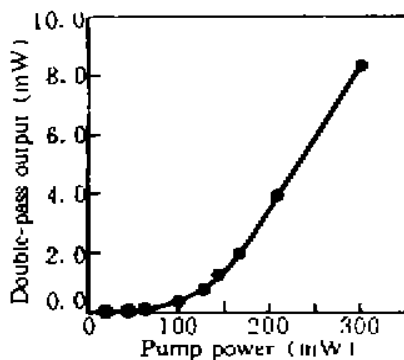


Fig. 2 The input-output curve of superfluorescence

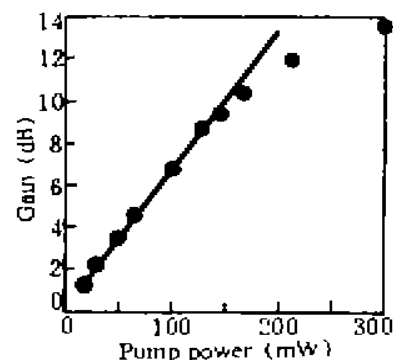


Fig. 3 The single-trip gain vs pump power. The gain starts to deviate from the line when pump power goes up to 150 mW

3.2 超荧光的谱宽-输出特性

输出的带宽是超荧光的重要参数之一。图 4 是双程情况下的线宽-输出特性。线宽的改变是一个迅速变化的过程,但没有显示出任何突变,而是由 11.6 nm(泵浦功率 70 mW)平滑地下降到 7.5 nm。根据双程超荧光的输入-输出特性,在泵浦功率为 70 mW 时已由线性区域进

入非线性区域，故谱线已呈一定程度的窄化。注意到双程情况下存在着明显的线宽饱和现象。当输出为 1.1 mW 时，输出的线宽就降到了 7.5 nm(图 5)，以后尽管泵浦功率进一步加强，但线宽已基本不变。

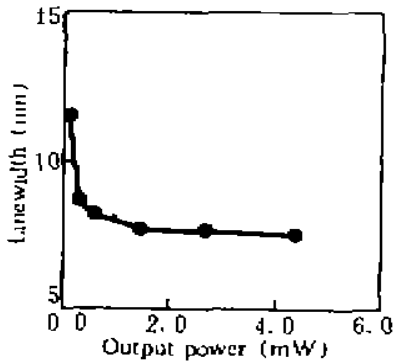


Fig. 4 The relationship between output and linewidth

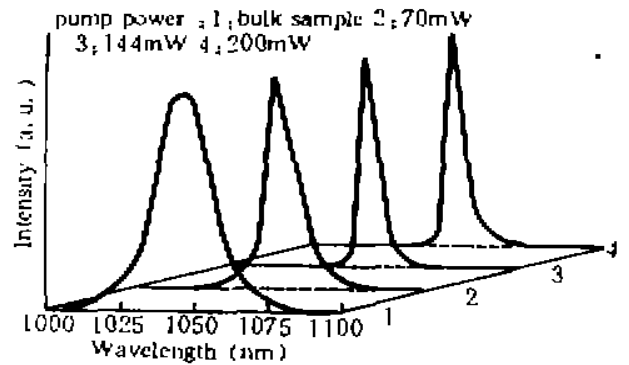


Fig. 5 The typical changes of linewidth of double-pass superfluorescence

1; 22 nm, 2; 11.2 nm, 3; 7.7 nm, 4; 7.5 nm

超荧光谱线的窄化是由于谱线中心的增益系数比其它波长的要高。增益越高，这种差别越大，故表现出随泵浦功率加大，线宽变窄^[10]。另一方面，增益大了，信号光受到的放大作用越大，易达到增益的饱和。对比双程情况下的输入-输出特性和谱宽-输出特性可见，输入-输出进入线性阶段基本上就是谱宽达到饱和的区域。

3.3 超荧光的激发特性

图 6 是泵浦功率保持在 100 mW 不变，激发波长在 780 nm~815 nm 的范围内，双程超荧光输出功率的变化情况。当激发波长为 795 nm 时，超荧光的输出最大，这与吸收峰值(794.6 nm)相吻合。从输出的变化可见，在低于 795 nm 处，激发特性曲线变化要比吸收谱变化得快。这可能与激发态吸收有关。在实验中已注意到较强的上转换发光，中心波长为 520 nm。这无疑降低了泵浦的激发效率。但有关上转换荧光强度的激发特性以及与 1.05 μm 发光的关系仍有待于进一步实验研究。

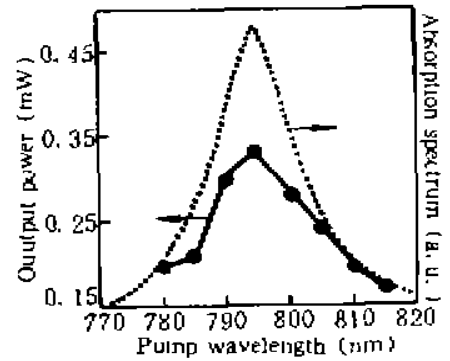


Fig. 6 The different exciting wavelength against the output of double-pass superfluorescence in the case of given pump power

3.4 理论分析

双程超荧光的输出为：

$$P_{out} = 2h\nu\Delta\nu(G - 1)(RG + 1) \tag{1}$$

式中 ν 为输出的频率， $\Delta\nu$ 为自发辐射的带宽， G 为单程增益， R 为双程结构下反射镜的反射率(实验中 $R \sim 1$)。根据实验， $h\nu \sim 1.9 \times 10^{-19} \text{ J}$ ， $\Delta\nu \sim 5 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ，求得 $2h\nu\Delta\nu \sim 2 \mu\text{W}$ 。在小泵浦功率范围，增益与泵浦功率 P_p 成正比，可表示为 $g = k_1 P_p + k_2$ ^[11]，由此得：

$$\ln(P_{out}/M + 1) = k_1 P_p + k_2$$

式中 k_1 、 k_2 为常数， $M = 2h\nu\Delta\nu$ 。图 7 中的实线为拟合曲线。随着泵浦功率的增加，增益偏离线性，此时增益可表示为 $g = k_3 P_p^2 + k_4$ ，代入(1)中得：

$$\ln(P_{out}/M + 1) = k_3 P_p^2 + k_4$$

图 7 中的虚线为饱和状态下的理论拟合曲线。定义饱和输出功率 P_{out}^{sat} 为实际测得的输出功率下降到 e 指数特性的一半时的功率水平。根据(1)式, 此时 G 近似下降到小信号增益的 $1/\sqrt{2}$ 。由图 7 易求得 $P_{out}^{sat} \sim 3$ mW (泵浦功率约 190 mW)。对比谱宽-输出特性, 这时带宽已基本不变了。在小泵浦功率情况下, 单程增益具有良好的线性关系(图 3), 直线的斜率为 0.6 dB/mW, 远高于 1.3 μm 处的泵浦效率 0.02~0.06 dB/mW \cdot m^{-12, 13}。因此, 在实验中未能观察到 1.3 μm 的荧光窄化现象。

前面已指出, 光纤超荧光具有相干度低的优点。作为估算, 带宽为 $\Delta\nu$ 的光源其相干长度为 $c/\Delta\nu$, 则双程超荧光的相干长度 ~ 150 μm 。而实验中求出的普通荧光的相干长度 ~ 60 μm 。相比于光纤激光器^[14]的相干长度 ~ 10 m, 超荧光的确是一种优良的非相干光源。

超荧光是一种自发辐射的放大过程。双程超荧光包括了两个传播方向上的自发辐射, 一个是沿泵浦光行进的方向, 另一个则是逆泵浦光方向。因而在(1)中出现了单程增益的乘积项。如果去掉耦合镜片 ($R = 0$), 可以预见输出将大大降低。将光纤离开镜片约 1 mm, 这样完全消除了镜片的作用, 成为单程结构。实验表明当泵浦功率达到 300 mW 时, 荧光输出功率仅 1 mW, 而且泵浦功率达到 120 mW 时, 输入-输出仍基本上呈现线性关系。甚至最高输出功率处, 也未超过文中所定义的阈值(图 8)。从线宽的变化看, 单程时线宽由 16.2 nm (泵浦功率 70 mW) 缓慢地下降到 7.6 nm (泵浦功率 300 mW), 这与双程情况下同样输出功率时的线宽近似相同。但在单程情况下由于泵浦功率的限制, 未能观察到明显的线宽饱和。

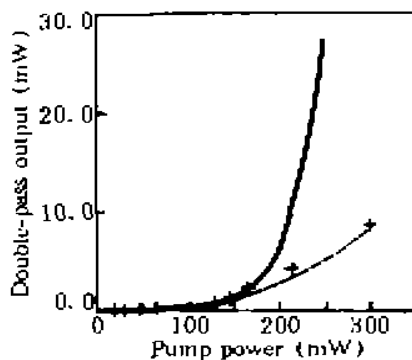


Fig. 7 The fitting curve to the measured data. The solid line shows a case of low pump power levels and the dashed one illustrates the saturation

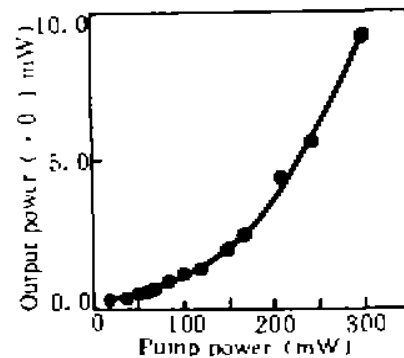


Fig. 8 The input-output curve of superfluorescence for single pass

由于光纤较短, 因而光纤对泵浦能量的吸收并不完全。实验中从光纤的出射端仍可观察到较强的泵浦光。考虑到 Nd³⁺ 的 1.05 μm 发射带是一个典型的四能级系统, 不存在荧光的基态吸收, 从理论上讲, 光纤越长越有利; 当然由于光纤的本底损耗, 光纤过长既不利于输出强度, 也不利于集成化, 因此光纤长度的选取应以使泵浦光基本被吸收为标准。

结 论 获得了氟化物玻璃光纤的超荧光输出。在双程情况下的最大输出功率为 8 mW, 线宽为 7.5 nm。实验和分析表明, 若以半导体激光器为泵浦源可获高效、紧凑的近红外超荧光光源。尽管双程情况下的效率远未达到转换效率的极限 $h\nu_s/h\nu_p \sim 76\%$, 这仅表明实验参量未能达到最佳状况, 但作为超荧光光源, 其波长的稳定性(不随激发波长改变而改变)和良好的非相干性(相干长度仅在微米量级), 使其不失为一种有发展前途的候选者。对比双程和单程两种结构, 显然从实用的目的来看, 双程性能更好。可由于双程需要对信号光高反、对泵浦

光高透的镀膜, 这大大限制了对泵浦波段的选择范围, 这也是在实用化中应该考虑的。

胡和方研究员提供了氟化物玻璃光纤, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] R. A. Bergh, B. Culshaw, C. C. Cutler *et al.*, Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes. *Opt. Lett.*, 1982, 2(11): 563~565
- [2] B. Moslehi, J. W. Goodman, M. Tur *et al.*, Fiber-optic lattice signal processing. *Proc. IEEE*, 1984, 72(7): 909~930
- [3] M. J. F. Digonnet, K. Liu, Analysis of a 1060 nm Nd:SO₂ superfluorescence fiber laser. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(7): 1009~1015
- [4] Fuxi Gan, Yihong Chen, The spectral characteristics of superfluorescence in rare-earth-doped silica fibers. *Pure Appl. Opt.*, 1993, (2): 359~365
- [5] P. R. Morkel, Erbium-doped fiber superfluorescence source for the fiber gyroscope. *Springer Proc. Phys.*, 1989, 44: 143~148
- [6] K. Iwatsuki, Er-doped superfluorescence fiber laser pumped by 1.48 μm laser diode. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, 2(4): 237~238
- [7] Y. Shi, O. Poulsen, High-power broadband singlemode Pr³⁺-doped fiber superfluorescence light source. *Electron. Lett.*, 1993, 29(22): 1945
- [8] M. J. F. Digonnet, Theory of superfluorescence fiber laser. *J. Lightwave Technol.*, 1986, 4(11): 1631~1639
- [9] E. Desurvire, J. R. Simpson, P. C. Becker, High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. *Opt. Lett.*, 1987, 12(13): 888~890
- [10] L. W. Casperson, A. Yariv, Spectral narrowing in high-gain lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1972, QE-8(2): 80~85
- [11] M. J. F. Digonnet, Closed-form expressions for the gain in three-and four-level laser fibers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26(10): 1788~1796
- [12] M. Brierley, S. Carter, P. France *et al.*, Amplification in the 1300 nm in a Nd-doped fluoride fiber. *Electron. Lett.*, 1990, 26(5): 329~330
- [13] Y. Miyajima, T. Sugawa, T. Komukai, Efficient 1.3 μm-band amplification in a Nd doped single-mode fluoride fiber. *Electron. Lett.*, 1990, 26(17): 1397~1398
- [14] 王韵, 祁长鸿, 胡和方等, 1.05 μm 氟化物玻璃光纤激光器的输出特性. *光学学报*, 1995, 15(17): 851~854

Double-Pass Forward Superfluorescence of Nd³⁺ Doped Fluoride Glass Fiber Pumped by 800 nm Laser

Wang Ji Qi Changhong Wu Tieqiang Shen Hongwei Gan Fuxi

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

(Received 14 January 1994; revised 18 April 1995)

Abstract The basic characteristics of double pass forward superfluorescence of Nd³⁺-doped fluoride glass fiber, such as input-output, output-linewidth, and output-wavelength (exciting) of the superfluorescence have been studied. The fitting formulae are given. The experiments suggest that the superfluorescence of fluoride glass fiber is a kind of low-coherence and high performances light source with bright application prospect.

Key words fluoride glass fiber, superfluorescence of Nd³⁺.