

文章编号:1673-9981(2010)04-0360-03

# 铟镜共掺磷酸盐光纤环形腔脉冲激光器\*

张伟南, 韦小明, 徐善辉, 杨中民

(华南理工大学光通信材料研究所, 广东 广州 510641)

**摘要:**利用管棒法拉制出单位长度增益大于 3.0 dB/cm 的高掺杂浓度的铟镜共掺磷酸盐单模光纤;以这种光纤作为增益介质,并利用非线性偏振旋转技术实现了毫瓦级脉冲激光输出.当泵浦功率为 300 mW 时,环形腔光纤激光器的平均输出功率为 8.13 mW,脉冲重复率为 17.1 MHz,脉冲激光光谱的 3-dB 带宽为 0.49 nm,转换极限脉冲宽度为 5.0 ps.

**关键词:**铟镜共掺磷酸盐光纤; 环形腔光纤激光器; 非线性偏振旋转

**中图分类号:** O43

**文献标识码:** A

近年来,随着铟镜共掺磷酸盐玻璃光纤在高功率单频窄线宽光纤激光器<sup>[1]</sup>、超短脉冲光纤激光器<sup>[2]</sup>和高功率单频脉冲光纤激光器<sup>[3]</sup>等方面的应用越来越广泛,对铟镜共掺磷酸盐玻璃光纤的性能要求也越来越高,尤其是在低传输损耗和高增益方面.最近,华南理工大学光通信材料研究所利用管棒法拉制出了高掺杂浓度的铟镜共掺磷酸盐玻璃光纤,其纤芯直径为 5.4 μm,在 1550 nm 处的数值孔径为 0.2.用 980 nm 半导体激光器泵浦长度为 1.5 cm 的铟镜共掺磷酸盐玻璃光纤,能获得大于 3.0 dB/cm 的净增益,比目前商用的石英光纤放大器高两个数量级<sup>[4]</sup>.本文着重研究这种光纤应用在超短脉冲光纤激光器中的激光特性.由于实验室只能提供最大输出功率为 400 mW 左右的 980 nm 泵浦源,因此,需利用数值模拟方法求得泵浦功率为 300 mW 时的最佳增益光纤长度.在实验方面,利用非线性偏振旋转锁模技术对环形腔光纤激光器进行调制,进而实现脉冲输出.

## 1 数值模拟

利用数值分析方法找出泵浦功率为 300 mW 时

的最佳增益光纤长度.由文献[5]和文献[6]我们得到铟镜共掺系统的传输方程(速率方程从略).

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -[2\pi \int_0^\infty [\sigma_{56}(v_p)n_5(r,z) + \sigma_{13}(v_p)n_1(r,z) - \sigma_{56}(v_p)n_6(r,z)] |E(r,z)|^2 r dr + \alpha(v_p)] P_p(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = [g_s(z, v_s) - g_a(z, v_s) - \alpha(v_s)] P_s(z) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中,  $n_1(r, z)$  是铟离子的<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>能级上的粒子数密度;  $n_5(r, z)$  和  $n_6(r, z)$  分别为铟离子的<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>和<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>能级上的粒子数密度;  $\sigma_{13}(v)$  和  $\sigma_{56}(v)$  分别为铟离子和铟离子的频率相关吸收截面;  $g_s(z, v)$  和  $g_a(z, v)$  分别为铟离子和铟离子的频率相关发射截面;  $\alpha(v)$  是增益光纤的频率相关背景损耗;  $P_s(z)$  和  $P_p(z)$  分别为泵浦光和信号光沿增益光纤纵向功率分布;  $h$  是普朗克常数.

为了分析方便,对铟镜共掺系统做以下简化:由于铟离子在<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>能级上的寿命很短,会很快跃迁到亚稳态能级<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>,因此<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>能级上的粒子数很小,可以假定其粒子数密度为 0;其次,在没有后向能量传输和能量上转换主要发生在亚稳态能级的情况下,铟离子系统可以简化为二能级系统<sup>[6]</sup>.基于以上简化,当激光器达到稳定状态时,式(1)和式(2)可以通

收稿日期:2010-10-20

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60977060);华南理工大学基金(B09E5060570)

作者简介:张伟南(1954—),男,广东广州人,工程师.

过数值分析方法求得其数值解<sup>[7]</sup>.当泵浦功率为300 mW时,增益沿增益光纤的纵向分布情况如图1所示.最佳增益光纤长度约为1.8 cm.模拟过程中用到的相关参数列于表1

表1 增益光纤的相关参数

名称/单位	物理意义	数值
$n_{Er}/m^{-3}$	Er <sup>3+</sup> 离子掺杂浓度	$2.5723 \times 10^{26}$
$n_{Yb}/m^{-3}$	Yb <sup>3+</sup> 离子掺杂浓度	$5.12 \times 10^{26}$
$\tau_{Yb}/s$	Yb <sup>3+</sup> 离子自发辐射寿命	$2 \times 10^{-3}$
$\tau_{Er}/s$	Er <sup>3+</sup> 离子自发辐射寿命	$9.4 \times 10^{-3}$
$A_{43}/s^{-1}$	Er <sup>3+</sup> 离子从 <sup>4</sup> I <sub>3/2</sub> 到 <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> 的非辐射弛豫率	$7 \times 10^9$
$A_{32}/s^{-1}$	Er <sup>3+</sup> 离子从 <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> 到 <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub> 的非辐射弛豫率	$2.8 \times 10^6$
$\sigma_{56}/m^{-2}$	Yb <sup>3+</sup> 吸收截面(976 nm)	$9.2442 \times 10^{-25}$
$\sigma_{65}/m^{-2}$	Yb <sup>3+</sup> 发射截面(976 nm)	$1.2695 \times 10^{-24}$
$\sigma_{12}/m^{-2}$	Er <sup>3+</sup> 吸收截面(1535 nm)	$4.9897 \times 10^{-25}$
$\sigma_{21}/m^{-2}$	Er <sup>3+</sup> 发射截面(1535 nm)	$6.0151 \times 10^{-25}$
$r_1/\mu m$	纤芯直径	5.4
$r_2/\mu m$	包层直径	125

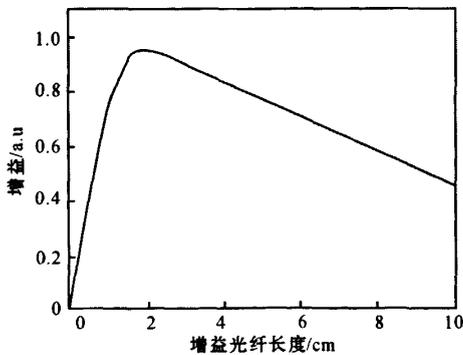


图1 增益沿增益光纤的纵向分布

## 2 实验

实验装置如图2所示.用长度为1.8 cm的钕镱共掺磷酸盐玻璃光纤(Er/Yb)作为增益介质;两个带尾纤的980 nm半导体激光器通过两个980/1550 nm波分复用器(WDM)对激光器进行前后向泵浦,

前向泵浦激光器的最大输出功率为180 mW,后向泵浦激光器的最大输出功率为240 mW;偏振相关隔离器(PD-ISO)用来实现激光单向运行;环形腔内激光的偏振态通过两个偏振控制器(PC)来调节;激光信号从一个2×2,10/90耦合器(OC)输出;环型谐振腔的总长度为12.0 m左右.

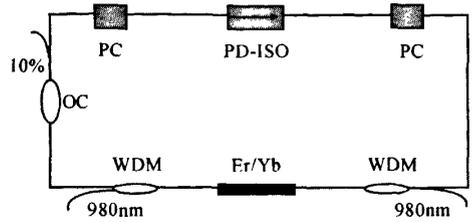


图2 NPR锁模光纤激光器

激光器连续光运转的阈值泵浦功率大约为75 mW,而锁模运转的阈值泵浦功率大约为210 mW.在实验中,当泵浦功率高于阈值泵浦功率时,适当调节两个偏振控制器,可实现锁模脉冲输出.随后,缓慢地减小泵浦功率,即使泵浦功率小于阈值泵浦功率(210 mW)时还能维持锁模运转的状态.这种滞后现象已被广泛报导<sup>[8]</sup>.当泵浦功率为300 mW(前向泵浦功率为140 mW,后向泵浦功率为160 mW)时,脉冲激光器的平均输出功率为8.13 mW,其斜效率约为3.6%.典型的脉冲序列如图3所示(由Tektronix TDS3052B型示波器测得),脉冲的重复率为17.1 MHz(接近理论计算值16.7 MHz).脉冲激光光谱如图4所示(由YOKOGAWA AQ6370B型光谱分析仪测得),光谱的中心波长为1533.91 nm,3-dB宽度为0.49 nm,经计算得到脉冲的转换极限宽

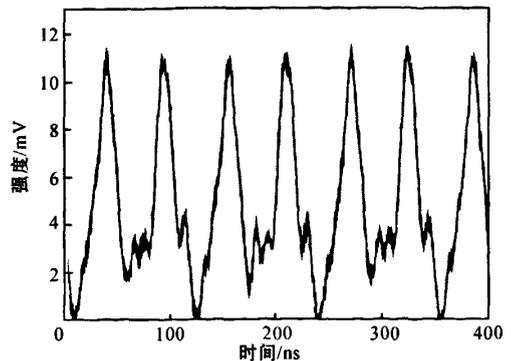


图3 锁模脉冲序列

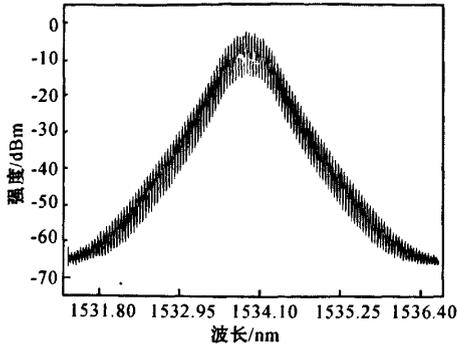


图4 锁模激光光谱

度为 5.0 ps(假设为双曲正割型). 在实验过程中, 输出激光光谱的中心波长可在 1533.2 nm 与 1535.6 nm 之间进行调谐. 多数情况下, 环形腔中只存在一个脉冲, 但通过调节偏振控制器, 可以实现多个脉冲同时运转.

### 3 结论

本文报导了一种利用管棒法拉制的高浓度铒镱共掺磷酸盐玻璃纤维. 利用非线性偏振旋转锁模技术实现了重复率为 17.1 MHz, 平均输出功率为 8.13 mW, 光谱 3-dB 宽度为 0.49 nm 的脉冲激光输出.

#### 参考文献:

[1] SPIEGELBERG C, GENG J, HU Y et al. , Low-noise

- Narrow-linewidth Fiber laser at 1550 nm (June 2003)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22 (1): 57-60.
- [2] PANASENKO D, POLYNKIN P; POLYNKIN A, et al. Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> femtosecond ring fiber oscillator with 1.1-W average power and GHz repetition rates[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18: 853-855.
- [3] POLYNKIN P, PEYGHAMBARIAN N, MOLONEY J. Efficient energy extraction from large-mode-area, short, heavily Er:Yb codoped phosphate-glass fiber for pulsed laser applications[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92:061115.
- [4] XU Shan-hui, YANG Zhong-min, ZHANG Qin-yuan et al. Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> codoped phosphate glass fiber with gain per unit length greater than 3.0dB/cm[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(7): 1955-1960.
- [5] NILSSON J, SCHEER P, JASKORZYNSKA B. Modeling and optimization of short Yb<sup>3+</sup>-sensitized Er<sup>3+</sup>-doped fiber amplifiers[J]. Photon Technol Lett, 1994, 6 (3): 383-385.
- [6] KARASEK M. Optimum design of Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> codoped fibers for large-signal high-pump-power applications[J]. Journal of Quantum Electronics, 1997, 30 (10): 1699-1705.
- [7] BUTCHER J C. Numerical methods for ordinary differential equations[M]. [S. l.]: Wiley, 2008; 123-299.
- [8] ZHAO B, TANG D Y, SHUM P, et al. Energy quantization of twin-pulse solitons in a passively mode-locked fiber ring laser [J]. Applied physics B, 2003, 77: 585-588.

## Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped phosphate fiber Short-pulse ring laser

ZHANG Wei-nan, WEI Xiao-ming, XU Shan-hui, YANG Zhong-ming

(Institute of Optical Communication Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

**Abstract:** A kind of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped phosphate fiber with gain per unit length greater than 3.0 dB/cm was fabricated by the rod-in-tube technique. It generated milliwatt pulse laser by using mode-locked technique of nonlinear polarization rotation (NPR). When the pump power was 300 mW, the average output power, pulse repetition rate, transform-limited pulse duration and 3-dB spectrum width of the laser were 8.13 mW, 17.1 MHz, 5.0 ps and 0.49 nm respectively.

**Key words:** Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped phosphate fiber; ring fiber laser; nonlinear polarization rotation