

1313nm 脉冲泵浦下掺 Er^{3+} 光纤中 多波长可见光的产生*

胡巍 刘东峰 王云才 陈国夫 王贤华 侯洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要 本文报道了以 1313nm Nd:YLF 激光脉冲泵浦掺铒(Er^{3+})单模 $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ 光纤而产生多波长可见光的实验,在该光纤中观察到(463~510)nm 间的多波长放大自发辐射过程,此过程对应于 Er^{3+} 离子的 $^2\text{G}_{7/2}$ 等几个激发态到 $^4\text{I}_{13/2}$ 亚稳态的跃迁. 其激发过程是分步的四光子吸收过程,同时,掺铒光纤的红外发射峰 1530nm($^4\text{I}_{13/2}-^4\text{I}_{15/2}$)与 1313nm 泵浦光之间的三波混频过程也对这一区间的连续多峰的光谱结构有贡献. 实验中还观察到 540nm 附近的绿光辐射.

关键词 放大自发辐射;三波混频;掺铒光纤

0 引言

近年来,随着掺铒光纤放大器和掺铒光纤激光器的深入研究,掺杂稀土元素石英光纤中的各种非线性过程引起人们注意,其中包括频率上转换过程^{1~3}. 利用这种从红外到可见光的放大自发辐射过程,可以做成超荧光光源或激光光源. 对掺铒光纤中的频率上转换已有许多研究,在不同的波长^{4~7}(980nm、1064nm、1319nm、1480nm)的连续^{5,7}或脉冲^{4,6}激光泵浦下的情况均有报道. 其主要的发射光有 540nm 的绿光和 463nm 的蓝光. 在不同泵浦波长,对应铒离子的同一跃迁的激发过程并不一样. 在 1319nm 激光泵浦下,540nm 跃迁($^4\text{S}_{3/2}-^4\text{I}_{15/2}$)对应激发过程是分步的三光子吸收⁶,而在 1064nm 激光泵浦下,540nm 跃迁对应激发过程则是双光子吸收⁴.

在这里我们研究了 1313nm 强脉冲泵浦下掺铒石英单模光纤中多波长可见光的频率上转换. 除已见报道的 525nm、540nm 的绿光和 463nm 的蓝光外,还有 463nm 附近多个波长发射光形成的准连续谱. 这些不仅与铒离子的放大自发辐射有关,也与掺铒光纤红外发射光 1530nm($^4\text{I}_{13/2}-^4\text{I}_{15/2}$)与 1313nm 泵浦光的三波混频有关.

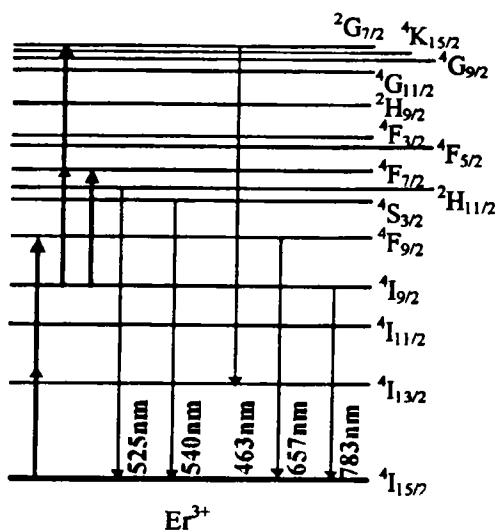


图 1 简化的 Er^{3+} 离子的能级图

Fig. 1 A simplified energy level diagram of Er^{3+} ions

1 实验装置

实验中使用一台调 Q 锁模运转的 Nd:YLF 激

* 国家自然科学基金及国家攀登计划飞秒激光技术和超快过程研究资助项目

收稿日期:1995-11-16

光器作为泵浦源,其输出波长是 1313nm,锁模脉冲宽度为 100ps,重复频率为 76MHz,调 Q 脉冲包络宽约 1.5 μ s,重复率是 1.0kHz. 经 25 $\times$ 显微物镜耦合进光纤中的最大平均功率约 400mW,对应调 Q 脉冲包络中心处的锁模脉冲的峰值功率有 35kW. 利用一台 1m 的光栅单色仪测量光谱. 分别用光电倍增管和 Ge 光电二极管接收可见光纤和红外光信号.

测试中使用的掺铒单模光纤的掺杂浓度是 500×10^{-6} (重量比),其芯径约为 6 μ m,截止波长是 0.975 μ m,在 1.3 μ m 处的吸收大于 2000dB/km. 图 1 是简化的 Er³⁺ 离子的能级图.

2 结果与讨论

图 2 给出了在 4.5m 长的掺铒光纤中,不同泵浦功率时典型的可见光光谱. 在高功率时,可以看到在 463nm 附近的有多个发射峰,而低功率时附近只有 463nm 的蓝光. 在高功率时,用肉眼可以看见从

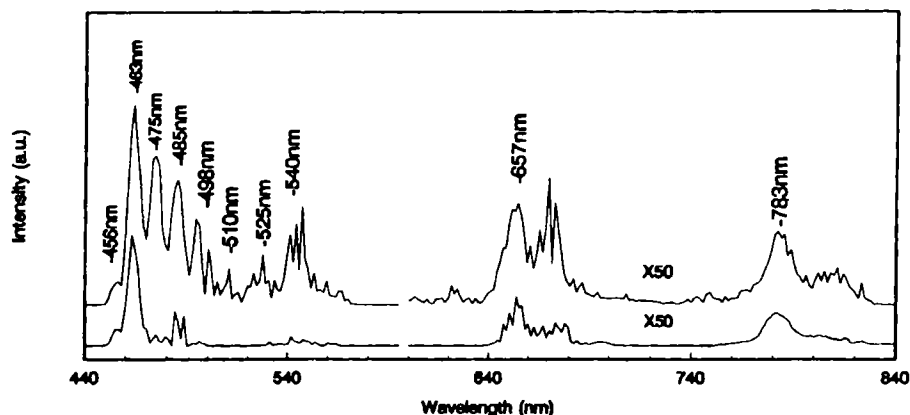


图 2 在 380mW(上)和 200mW(下)的泵浦功率下,4.5m 长掺铒光纤发射的可见光光谱.

Fig. 2 The spectrum of visible light emitting from 4.5m long Er³⁺-doped fiber at pump power of 380mW(top)and 200mW(bottom)

光纤侧面漏出的蓝光. 463nm 蓝光对应²G_{7/2}态到亚稳态⁴I_{13/2}的跃迁. 525nm 和 540nm 绿光分别对应²H_{11/2}和⁴S_{3/2}态到基态⁴I_{15/2}的跃迁. 657nm 的红光对应⁴F_{7/2}态到基态⁴I_{15/2}跃迁,并与 1313nm 泵浦光的倍频过程产生共振. 783nm 对应⁴I_{9/2}态到基态⁴I_{15/2}的跃迁. 657nm 和 783nm 的强度比蓝光和绿光的强度小近两个量级. 图 3 则给出了掺铒光纤中典型的红外光谱. 在 1530nm 的发射光对应⁴I_{13/2}态到基态⁴I_{15/2}的跃迁. 这也是掺铒光纤放大器与掺铒光纤激光器工作的波长.

Er³⁺ 离子的激发过程如下⁶:首先经双光子共振吸收从⁴I_{15/2}基态激发到⁴F_{7/2}态,再经快速的无辐射转移到⁴I_{9/2}态. 从这里,一部分离子进一步吸收一个光子到⁴F_{7/2}态,经无辐射转移至²H_{11/2}态和⁴S_{3/2}态,然后跃迁到基态发射 525nm 和 540nm 绿光;另一部分则进一步吸收两个光子到²G_{7/2}态,之后跃迁到亚稳态⁴I_{13/2}发射 463nm 的蓝光. 所以,蓝光是分步的四光子吸收过程,绿光是分步的三光子吸收过程. 图 2 中微弱的 657nm 和 783nm 信号正说明 Er³⁺ 离子的激发是分步的.

在高功率时,部分²G_{7/2}态离子无辐射转移至邻近的²K_{15/2},⁴G_{9/2}和⁴G_{11/2}态,然后共同跃迁到亚稳态⁴I_{13/2},发射 475nm,485nm 和 498nm 光,在 463nm 附近形成多峰的准连续谱. 同时,1530nm(⁴I_{13/2}

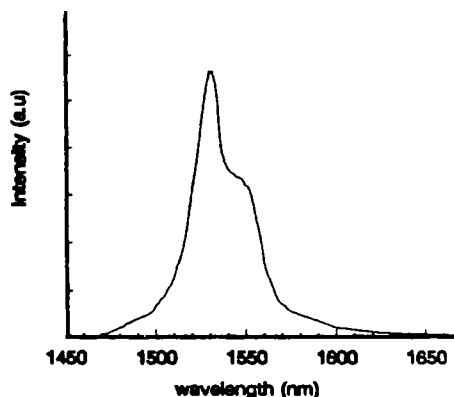


图 3 在 380mW 泵浦功率下,4.5m 长掺铒光纤发射的红外光谱

Fig. 3 The spectrum of infrared radiation emitting from 4.5m long Er³⁺-doped fiber at pump power of 380mW

$-^4\text{I}_{15/2}$) 和 1313nm 红外光的三倍频和三波混频光也在这一区域. 泵浦光 1313nm (Ω_0) 与发射光 1530nm (Ω_1) 的三波混频产生 438nm ($3\Omega_0$), 456nm ($\Omega_0 + \Omega_1$), 485nm ($\Omega_0 + 2\Omega_1$), 510nm ($3\Omega_1$) 等多个波长. 由于单色仪中光栅在 450nm 以下的衍射效率急剧下降, 所以未检测到 438nm 光, 而其他三个波长都有相应发射光. 其中 485nm 与 $^4\text{G}_{9/2} - ^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁的波长重合. 正是由于调 Q 锁模激光脉冲具有很高的峰值功率, 引起了多种非线性过程, 使 456nm~510nm 间形成了多峰的准连续光谱.

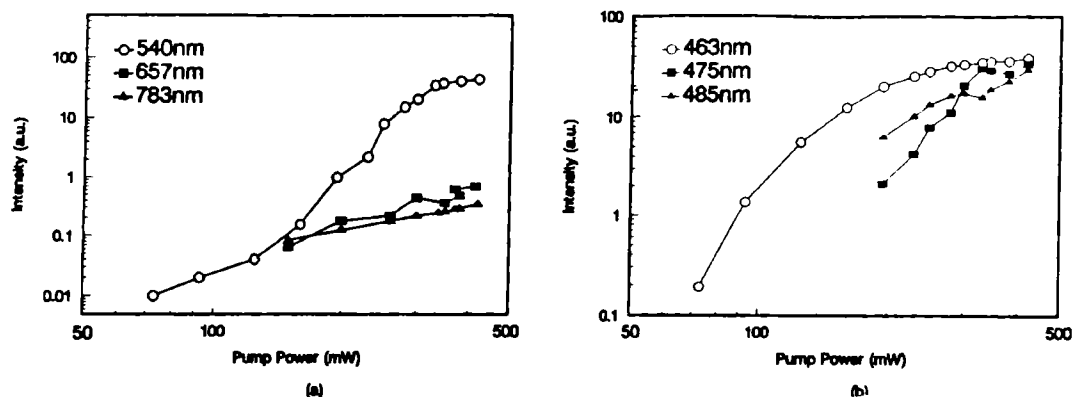


图 4 在 4.5m 掺铒光纤中各谱线强度与泵浦功率的关系. (a) 为 783nm, 657nm 和 540nm. (b) 为 463nm, 475nm 和 485nm

Fig. 4 Spectrum intensity of different wavelength as a function of pump power in 4.5m long Er^{3+} -doped fiber. (a) different wavelength at 783nm, 657nm, 540nm. (b) different wavelength at 463nm, 475nm and 485nm

为了进一步验证各谱线的激发和跃迁机制, 图 4 给出了在 4.5m 掺铒光纤中各谱线强度与泵浦功率的关系. 在双对数坐标中, 曲线的斜率代表了激发过程的复杂程度. 在图 4(a) 中, 783nm 和 657nm 的曲线近似为直线, 其斜率分别是 1.4 和 1.9, 说明他们都是经双光子吸收后形成的荧光跃迁. 540nm 绿光的变化在 150mW 泵浦功率以下时为直线, 其斜率是 2.6, 说明是三光子过程, 而当泵浦功率进一步增大时开始偏离直线, 斜率增大, 这是放大自发辐射的特征⁶.

在图 4(b) 中, 463nm 的蓝光在 150mW 泵浦功率以下时近似为直线, 其斜率是 4.1, 说明是四光子过程. 当泵浦功率大于 150mW 时, 其强度开始饱和而偏离直线, 斜率减小. 475nm 的强度变化有明显的阈值, 阈值泵浦功率正好是 150mW. 这说明当铒离子在 $^2\text{G}_{7/2}$ 态上的粒子数达到一定阈值时, 部分离子才开始无辐射转移至邻近的 $^2\text{K}_{15/2}$ 、 $^4\text{G}_{9/2}$ 和 $^4\text{G}_{11/2}$ 态, 跃迁后形成蓝光附近的多峰光谱结构. 同时 463nm 的跃迁也因此开始饱和. 另外, 475nm 的强度变化曲线的斜率是 5.2, 这是高次非线性的表现. 而图中 485nm 的强度变化曲线的斜率只有 2.8, 说明在这里三波混频的贡献是主要的.

在对较短的 3m 长掺铒光纤的测试表明, 各个波长处的信号强度都降低了, 在 463nm 附近的多峰结构也消失了. 这与前面的讨论是一致的, 短光纤和低功率时都不能达到 $^2\text{G}_{7/2}$ 能级的粒子数阈值, 因而不形成多峰的光谱结构.

4 结论

我们研究了 1313nm 强激光脉冲泵浦下, 掺铒石英单模光纤中多波长可见光的频率上转换. 除观察到已报道的三光子过程的 525nm、540nm 的绿光和四光子过程的 463nm 的蓝光外, 还有 463nm 附近多峰光谱结构. 这些结构不仅与铒离子从 $^2\text{G}_{7/2}$ 、 $^2\text{K}_{15/2}$ 、 $^4\text{G}_{9/2}$ 和 $^4\text{G}_{11/2}$ 等态上到亚稳态 $^4\text{I}_{13/2}$ 的跃迁有关, 也与掺铒光纤红外发射光 1530nm ($^4\text{I}_{13/2} - ^4\text{I}_{15/2}$) 与 1313nm 泵浦光的三波混频有关. 铒离子在 $^2\text{G}_{7/2}$ 态粒子数达到一定阈值时, 才开始无辐射转移至邻近的 $^2\text{K}_{15/2}$ 、 $^4\text{G}_{9/2}$ 和 $^4\text{G}_{11/2}$ 态, 并引起 463nm 光强度的饱和.

感谢电子工业部 46 所申云华教授为我们提供掺铒光纤.

参考文献

