文章编号:1001-5078(2012)02-0143-05

激光器技术・

# 同步脉冲泵浦抑制光纤放大自发辐射实验研究

陈 博,宁继平,张伟毅

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072)

摘 要:放大的自发辐射(ASE)是影响掺 Yb<sup>3+</sup>光纤放大器效率的重要因素之一。为了抑制 ASE,本文从放大器的泵浦方式着手,设计并搭建了同步脉冲泵浦的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤放大器,证实了其具有明显抑制 ASE 的效果。在重复率 400 Hz 时,将平均功率 15 mW,脉宽 500 ns 的信号光放大至 170 mW,实现增益 10.5 dB。同时实验研究了不同泵浦脉宽对于 ASE 生成的 影响。

关键词:光电子学;光纤放大器;掺Yb<sup>3+</sup>包层光纤;ASE;同步脉冲泵浦 中图分类号:TN722 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.02.006

# Experimental research on restraining amplified spontaneous emission of fiber amplifiers by synchronous pulse pumping

#### CHEN Bo, NING Ji-ping, ZHANG Wei-yi

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Science and Technology of Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Amplified spontaneous emission(ASE) is one of the most important factors that reduce the fiber amplifier's efficiency. In order to restrain ASE, a synchronously pulse-pumped Yb-doped double-clad fiber amplifier is designed, which is proven to have significant effect of reducing the power of ASE. At a repetition of 400 Hz, the power of the signal with pulse duration of 500 ns and average power of 15 mW, is up to 170 mW and a gain of 10.5 dB is obtained. Meanwhile, the impact of different pulse width on the ASE has also been studied.

Key words: optoelectronics; fiber amplifier; Yb-doped double-clad fiber; ASE; synchronous pulse pump

#### 1 引 言

稀土掺杂的光纤放大器因为具有结构紧凑、泵 浦效率高、阈值低、光束质量好等优点而备受人们的 青睐。其中,Yb<sup>3+</sup>具有简单的能级结构和大的能级 间隔,不仅能量转换效率高,还拥有无激发态吸收和 浓度淬灭的优势,因而掺杂 Yb<sup>3+</sup>的光纤放大器,成 为了高功率激光放大的首选<sup>[1-2]</sup>。

光纤的非线性效应和放大噪声是影响掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器效率的最主要因素。其中放大噪声中对 输出影响最大的是放大的自发辐射(ASE)。在高功 率泵浦情况下,脉冲之间放大器增益会迅速提高, ASE 会迅速积累以至达到饱和。由此导致的寄生振 荡会消耗上能级的粒子数,从而限制了以激活粒子 形式储存在增益光纤中的能量<sup>[3-4]</sup>。ASE 功率大小 与增益光纤长度、泵浦功率、泵浦方式以及端面反射 率都有密切关联<sup>[5-8]</sup>。合理选择泵浦方式和以上参 数能够有效抑制 ASE。除此之外,在脉冲放大间隔 内 ASE 功率的积累,也是影响其功率的重要因 素<sup>[9]</sup>。这个现象在低重复率信号放大时会表现得 更加突出,因为脉冲间隔较长,上能级粒子数一直处 于较高水平,此时 ASE 产生的积累放大功率应该在 总 ASE 功率中占有相当大的比重。

从这个角度出发,本文基于主振荡功率放大结构(MOPA),设计并搭建了同步脉冲泵浦的掺Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤放大器,对主动调Q信号进行放大。旨

**作者简介:**陈 博(1986-),男,硕士研究生,主要从事光纤放 大器方面的研究。

收稿日期:2011-05-19;修订日期:2011-07-01

在通过更有针对性的泵浦,减少脉冲间隔时的 ASE 生成,以达到抑制放大信号 ASE 的作用,最终实现 了放大增益为 10.5 dB 的信号输出。同时实验分析 了不同泵浦脉宽对于 ASE 生成的影响。

#### 2 实验原理

实验的基本结构如图 1 所示,采用了 MOPA 结构。虚线框中的部分是信号源,由 915 nm 半导体激 光器(LD)泵浦掺镱双包层光纤(YDDCF)构成,通 过光纤布拉格光栅(FBG)的选模作用实现 1064 nm 的信号输出。a 是由折射率渐变透镜构成的一对光 纤准直器,b 是声光调制器(AOM),a,b 共同实现主 动调 Q,使得信号源可以实现重复率可调的脉冲输 出。输出信号通过裸纤适配器经法兰盘接入放大级 (图 1 中 c 点)。放大级由 975 nmLD 泵浦 YDDCF 构成,M1 是 45°时对波长 975 nm 高反,1064 nm 高 透的二色镜,用于滤除剩余泵浦光。



图 1 同步脉冲泵浦掺镱双包层光纤放大器实验结构示意图

Fg. 1 the experimental setup of synchronous pulse-pumped Yb-doped double-clad fiber amplifier

该放大器与通常 MOPA 结构放大器主要有两 点不同:一是放大级的泵浦源 LD 以脉冲形式工作: 二是存在连结信号源和放大级的同步和延时装置 (delayer),它实现泵浦脉冲与信号脉冲的一一对 应。delayer由两个555芯片搭建而成,连接着放大 级 LD 电源的信号检测端和 AOM 驱动源的外接信 号端。每当 LD 发出一个泵浦脉冲时,其电源检测 端发出相应的电信号,经延时后驱动Q开关打开, 从而实现了信号和泵浦的同步。当放大级注入一段 泵浦时,信号脉冲能够紧随其后输入。这种泵浦形 式大大提高了泵浦的利用率和针对性,可以想见在 信号脉冲重复率较低的情况下,应取得显著的抑制 ASE 的效果。因为一个泵浦脉冲引起的粒子数反转 立刻就被随之到来的信号光消耗,在信号间隔时间 内并没有持续的泵浦光补充,所以并不存在很高水 平的上能级粒子数,ASE 很难实现饱和。其功率相 对于连续泵浦时应当显著下降。如果我们适当改变

泵浦脉冲的宽度,使此时的脉宽在能够提供较高 水平粒子数反转用于信号放大的基础上,又不至 于提供过多能量使 ASE 饱和,则理论上应当能够 找到放大效率较高而 ASE 又被显著抑制的最佳脉 宽取值。

### 3 实验结果和分析

信号源的掺镱双包层光纤是 CorActive 公司生 产的 las-yb-10-0.2,纤芯直径为 10 μm,内包层为八 角形,915 nm 泵浦光吸收效率为 2 dB/m,选用光纤 长度为 7 m。耦合器(图 2 中 coupler1)为 (2+1)×1 多模泵浦耦合器,信号插入损耗少于 0.35 dB。FBG 中心波长 1064.48 nm,反射率 99.147%。放大级增益光纤采用的是国产 D 型掺镱 双包层光纤,纤芯直径为 30 μm,数值孔径为 0.07; 内包层直径为 350/400 μm,数值孔径为 0.49,光纤 对 975 nm 泵浦光吸收系数为 1.2 dB/m。耦合器 (图 2 中 coupler2)为(6+1)×1 多模耦合器。



图 2 400 Hz 时信号光谱和波形 Fg. 2 the spectrum and pulse shape of signal with 400 Hz repetition

信号源能够实现重复率从 100 Hz ~ 20 kHz 可 调,本实验主要集中研究低重复率的情况,图 2 分别 是信号源重复频率 400 Hz 时的光谱和波形。可以 看出信号宽度在 500 ns 左右。当重复率从 100 ~ 1000 Hz 变化时,脉冲信号光谱变化不大,脉宽因为 上能级储能变化而发生波动,但是总体保持在几百 纳秒量级。



经过同步脉冲泵浦放大后的输出信号光谱如图 3(a)所示,通过二色镜后的 975 nm 泵浦光相对于 1064 nm 信号光比例已经很低,同时可以观察到增 益光纤的 ASE 主要集中在大于 1064 nm 的范围内, Yb<sup>3+</sup> 1030 nm 发射峰处 ASE 并不明显<sup>[10]</sup>, 所以下 文对于信号光 ASE 光谱的观察均集中在 1064 nm 右侧。图3(b)是示波器显示的同步泵浦示意图,信 道一是泵浦检测端的电信号波形,信道二是信号光 波形,可以看出脉冲信号由泵浦下降沿触发,恰好在 泵浦结束时注入。为了能够既展现较低重复率对于 ASE 的抑制效果,又能够获得较大的输出平均功率, 从而有利于光谱的观察, 选择重复率为400 Hz。 当泵浦脉宽为 600 µs 时,将输出平均功率 15 mW 的信号光放大至170 mW,实现增益10.5 dB,脉冲 能量  $425 \mu$ J。放大信号光谱和波形如图 4(a)、图 4 (b)所示,可以看出信号波长右侧 ASE 较为平缓,此 时的信号脉宽为 538 ns。为了与连续泵浦进行比 对,我们将泵浦方式改为连续,调整 AOM 驱动源为 内部工作模式,设置开关频率仍为 400 Hz,信号放 大后光谱和波形如图 5(a)、图 5(b)所示,输出脉宽 为 550 ns,相对于脉冲泵浦时略有展宽,此时获得 增益为12.5dB。虽然增益和输出平均功率比脉





冲泵浦均有所提高,但是光谱形状也发生了明显 变化,在1060~1080 nm 处,相对于脉冲泵浦平缓 的 ASE 变化,连续泵浦时则出现了非常明显的起 伏,ASE 的比例也有了明显上升,充分体现了同步脉 冲泵浦对于 ASE 有较明显的抑制作用。需要说明 的是,因为实验条件的限制,我们所采用的泵浦功率 较低,只有几瓦量级,而在高泵浦功率的情况下, ASE 会显著增长,脉冲泵浦对于 ASE 的抑制也会有 更加显著的效果。

为了探究不同泵浦脉宽对于信号放大效果和 ASE 生成的影响,保持重复率 400 Hz,采用同步脉 冲泵浦方式,在300~900 µs 范围内调整泵浦脉宽, 观测光谱变化可以发现:随着泵浦脉宽的增加,开始 时信号光和 ASE 的功率都随之成比例增长,不过当 泵浦脉宽超过 600 μs 时,继续增加泵浦脉宽,信号 光的功率变化不大,而 ASE 光谱发生显著变化,存 在一个增长较快的阶段。如图6所示,图6(a)~图 6(c)分别为泵浦脉宽为600 μs,800 μs 和900 μs 时 的输出光谱。可以看出 ASE 的逐渐增长过程,在 900 μs 时信号光波长 10 nm 范围内 ASE 相对于 600 μs 增长非常显著,光谱已经有向连续泵浦变化 的趋势。这说明此时泵浦能量有更大比例转移到了 ASE 功率中,信号通过后剩余的反转粒子数显著增 多,从而促进了 ASE 的快速增长。因此,当泵浦脉 冲的脉宽选取 600~700 µs 时,能够获得较好地抑 制 ASE 的效果。







#### 4 结 论

本文提出了使用同步脉冲泵浦方式来抑制光纤 放大器 ASE 的思想,并在此基础上进行了实验,取 得了比较明显的效果。同时研究了不同泵浦脉宽对 于 ASE 生成的影响,提出了最佳泵浦脉宽的选取。 为低重复率应用下提高光纤放大器效率提供了新的 思路。

## 参考文献:

- Liem A, Limpert J, Zellmer H, et al. 100 W Single-frequency master-oscillator fiber power amplifier [J]. Opt. Lett. ,2003,28(17):1537-1539.
- [2] Jeong Y, Nilsson J, Sahu JK, et al. Single-frequency, polarized ytterbium-doped fiber MOPA source with 264 W output power [J]. Opt. Lett. ,2005,30(5):459-461.
- [3] Sintov Y, Glick Y, Koplowitch T, et al. Extractable energy from erbium-ytterbium co-doped pulsed fiber amplifiers and lasers [J]. Opt. Commun, 2008, 281 (5): 1162-1178.
- [4] Han Qun, Ning Jiping, Zhou Lei, et al. Impact of ASE on high power Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers [J]. Laser Technology, 2008, 34(3):541-544. (in Chinese) 韩群, 宁继平,周雷,等. 高功率 Er/Yb 共掺光纤脉冲 放大器中 ASE 的影响分析[J]. 激光技术, 2008, 34 (3):541-544.
- [5] Limpert J, Liem A, Gabler T, et al. High-average-power picosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. Opt. Lett., 2001,26(23):1849-1851.
- [6] Zhan Yi, Zheng Yi, Zhao Yuhui, et al. The gain and noise characteristics of double cladding ytterbium-doped fiber amplifiers at different pump modes[J]. Laser Technology, 2007,31(1):50-53. (in Chinese)
  詹仪,郑义,赵玉辉,等. 不同抽运方式下掺 Yb<sup>3+</sup>光纤放大器的增益和噪声特性[J]. 激光技术, 2007,31 (1):50-53.

- [7] Zhao Zhenyu, Duan Kailiang, Wang Jianming, et al. Comprehensive analysis of amplified spontaneous emission noise of Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier[J]. Laser Technology, 2009, 33(6):611-618. (in Chinese)
  赵振宇,段开椋,王建明,等. 掺 Yb<sup>3+</sup>光纤放大器的自发辐射噪声分析[J].激光技术, 2009, 33(6):611-618.
- [8] Huang Bangcai, Liu Fengnian, Xu Lingling, et al. Distributed side-pump double-cladding pulse fiber amplifier[J].
  Laser & Infrared, 2008, 38(9): 879-882. (in Chinese)
  黄榜才, 刘丰年, 徐玲玲, 等. 侧面分布式泵浦双包层

脉冲光纤放大器 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (9): 879-882.

- [9] Liu Fengnian, Xu Lingling, Fan Wande, et al. Experiment of 1064 nm, small signal, nanosecond Yb-doped fiber amplifier[C]. OFCIO, 2007;262-266. (in Chinese) 刘丰年,徐玲玲,范万德,等. 1064 nm 小信号纳秒脉冲 掺 Yb 光纤放大器的实验研究[C]. 全国第十三次光纤 通信暨第十四届集成光学学术会议, 2007;262-266.
- [10] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al. Ytterbiumdoped fiber amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33 (7): 1049-1056.