

文章编号: 1001-3806(2009)05-0452-03

全光纤结构高增益脉冲光纤放大器的实验研究

张鹏, 段云锋, 黄榜才, 潘蓉, 宁鼎

(中国电子科技集团公司 第46研究所, 天津 300220)

摘要: 为了探讨多级级联掺镱光纤放大器的脉冲放大特性, 采用主振功率放大技术(MOPA), 实验研究了3级级联、全光纤结构的高增益脉冲激光放大器。通过优化各放大级增益光纤的长度和抽运光功率的大小, 在保证高放大增益的同时, 抑制了掺镱光纤中自发辐射光的自生激光振荡, 并对第2放大级进行了结构优化。在脉冲激光放大过程中实现了中心波长1064nm、脉冲宽度19ns、重复频率5kHz、峰值功率3.8kW、总放大增益达43.8dB的稳定激光输出。同时, 制作完成了1台结构紧凑、全光纤结构的脉冲光纤放大器样机, 对重复频率1Hz的低频脉冲信号进行了放大实验, 也得到了43.2dB的输出信号增益。结果表明, 本脉冲光纤放大器对低频脉冲信号有很好的放大效果。

关键词: 光纤放大器; 高增益; 主振功率放大; 全光纤结构; 3级级联

中图分类号: TN722; TN253

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.002

Experimental study about all-fiber high-gain pulse fiber amplifiers

ZHANG Peng, DUAN Yun-feng, HUANG Bang-cai, PAN Rong, NING Ding

(The 46th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China)

Abstract: In order to study the characteristics of pulse amplification in multi-stage cascade ytterbium-doped fiber amplifiers, the three-stage high-gain pulse fiber amplifier with all-fiber structure was experimentally studied based on the master oscillator power amplifier(MOPA) technology. The length of the gain fibers and the pump powers in every stage were optimized experimentally to obtain high signal gain, and the spurious lasing of the amplification stimulation emission light was suppressed at the same time. The stable output was obtained with a peak wavelength of 1064nm, pulse duration of 19ns, repetition frequency of 5kHz, the peak power of 3.8kW, and the total gain of 43.8dB. The compact prototype of an all-fiber pulse fiber amplifier was developed and used to amplify a pulse signal at 1Hz repetition frequency, a signal gain of 43.2dB was obtained. The results show that this amplifier has a good amplification effect on the pulse signal at a low repetition frequency.

Key words: fiber amplifier; high gain; master oscillator power amplifier; all fiber structure; three-stage cascade

引言

脉冲光纤激光器在保持了连续光纤激光器高光束质量、高斜率效率、结构紧凑等优势的同时, 具有更高的峰值功率, 更有利于实际应用^[1-2]。因此, 脉冲光纤激光器在工业加工、医疗、光通讯、激光雷达等领域受到越来越多的关注^[3-4], 而高可靠性、实用化的脉冲光纤激光器已成为研究重点。主振功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)技术是实现高脉冲能量、高峰值功率脉冲激光输出的主要方式^[5-8], 它可以通过种子光源来控制输出激光的特性, 容易实现多级放大。密西根大学的CHENG等人利用多级MOPA结构, 获得了波长1064nm、单脉冲能量82mJ(500ns), 峰

值功率2.4MW(4ns)的激光输出^[5]; 美国的Aculight公司结合掺镱光子晶体光纤和MOPA技术, 实现了光谱线宽20GHz、脉冲能量4.3mJ、峰值功率4.5MW的近衍射极限($M^2 \approx 1.3$)脉冲激光输出^[6]。国内, 清华大学通过脉冲抽运的方式实现了低重复频率的高峰值功率脉冲光纤激光输出^[7], 中国科学院上海光学精密机械研究所利用全光纤结构实现了平均功率20W、接近衍射极限的脉冲激光输出^[8], 这些光纤激光器都具有各自的特点。

本文中主要对3级级联、全光纤结构的脉冲光纤放大器进行了实验研究。在输入低功率信号的情况下, 获得了高达43.8dB的输出信号增益。输出激光的中心波长1064nm、重复频率5kHz、脉冲宽度19ns、脉冲峰值功率达3.8kW, 并制作出一台全光纤结构的脉冲光纤放大器样机, 利用低频脉冲信号进行了放大实验。

1 实验装置

3级级联、全光纤脉冲放大器的实验装置如图1

作者简介: 张鹏(1982-), 男, 助理工程师, 现主要从事光纤激光器、放大器及相关技术的研究工作。

E-mail: zpmiro@sina.com.cn

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-02-12

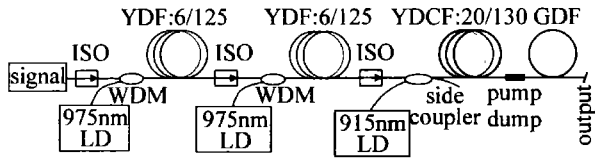


Fig. 1 The setup of a three-stage all-fiber pulse fiber amplifier

所示。其中所有的元器件均采用光纤焊接的方式进行连接。第1、第2放大级的种子脉冲激光(signal)和抽运半导体激光器的光功率均通过波分复用器(wavelength division multiplexer, WDM)耦合注入到增益光纤,而第3放大级则通过侧面耦合器(side coupler)进行抽运光功率的耦合;每个放大级之前插入光隔离器(isolator, ISO),以避免反向传输光影响种子光源或前一放大级的工作特性,避免对前一放大级的LD造成损害,保证整个放大器的安全稳定工作。在第3放大级掺镱双包层光纤(Yb-doped double-clad fiber, YDCF)的末端,采用抽运光滤除技术(pump dump)消除掺镱光纤(Yb-doped fiber, YDF)内包层中的剩余抽运光和放大自发辐射光。在掺镱光纤后焊接一段几何尺寸相匹配的无源光纤(Ge-doped fiber, GDF)作为输出尾纤,并把输出端面处理为斜角,以抑制光纤端面的菲涅耳反射和放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)的自生激光振荡。

信号光源为尾纤输出的调Q固体激光器,输出激光中心波长1064nm,重复频率5kHz~50kHz可调。3个抽运光源均为单发射体结构的半导体激光器,第1、第2放大级的LD为单模尾纤输出,中心波长975nm,最大输出功率250mW,第3放大级的LD为多模尾纤输出,中心波长915nm,最大输出功率6W。前两个放大级所用的掺镱光纤为单模光纤,第3放大级采用大模场面积的掺镱双包层光纤,其内包层形状为八边形,纤芯直径为20 μm ,纤芯数值孔径为0.08,915nm波长处的内包层吸收系数为3.2dB/m。侧面耦合器是中国电子科技集团公司第46研究所自行研制的,它使用与镱纤匹配的无源双包层光纤和多模光纤利用熔融拉锥技术拉制而成。其抽运光功率的耦合效率为不小于60%,种子光的耦合效率不小于95%,抽运输入端对输出端反向传输光的隔离度大于17dB,可以有效地保护抽运LD的安全工作。

2 实验结果及分析

作为第3放大级的输入信号,当第2放大级的输出信号增益和信噪比都达到最佳时,有利于第3放大级产生较高的信号增益,使得整个放大器有较好的输出效果。因此,把第1、第2级整合在一起进行参量优化,以便2级后得到最佳输出效果。实验过程中,当1

级、2级的增益光纤长度分别为10m和6m、抽运光功率分别为150mW和120mW时,2级输出得到了29dB的信号增益,信噪比为18.7dB,如图2a所示。其它参

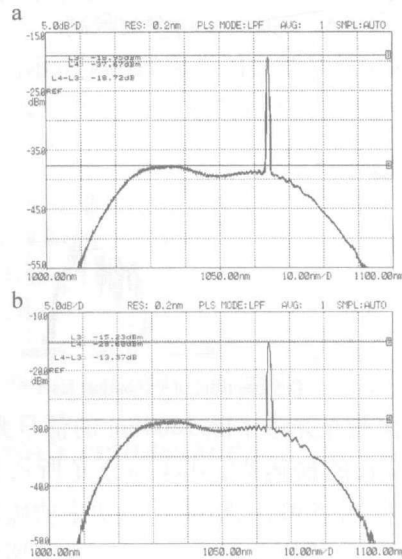


Fig. 2 The spectrum of the second stage laser

量不变,当1级的抽运功率增加到180mW时,2级的输出信号增益比之前高了3.7dB,但ASE峰值的放大增益却增加了9dB,使得输出信噪比迅速减小,只有13.4dB,比之前低了5.3dB,如图2b所示。增加1级抽运光功率的过程,ASE的放大增益明显地高于信号的放大增益。对于第3放大级来说,增大1级抽运功率虽然增大了其输入信号功率,使得最后输出也有可能获得更高的输出功率和信号增益,但是会造成输出信噪比的恶化,甚至有可能造成ASE的自生激光振荡,在本实验千瓦量级的峰值功率情况下,会对系统中的某些元器件造成损害,甚至烧毁。因此,在放大器工作时,为了保证输出信号的信噪比和系统的安全稳定,1级、2级的抽运光功率分别设定为150mW,120mW。

实验过程中第3级增益光纤的长度为4m。当信号光源工作在5kHz、平均功率15 μW 时,第1、第2放大级的抽运光源分别工作在150mW,120mW,逐渐增加第3放大级抽运LD的电流,测量了3级级联、全光纤脉冲放大器的输出功率,得到了3级LD驱动电流和放大器信号增益的关系曲线见图3。当LD工作在6A时,测得放

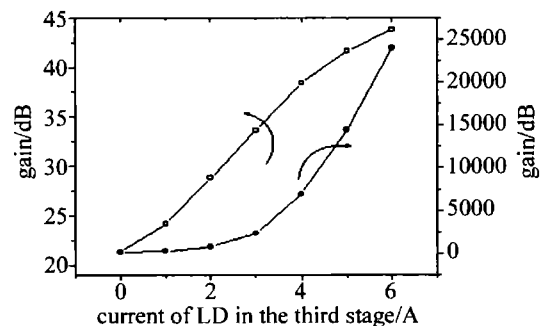


Fig. 3 The signal gain vs. the current of the third stage

大器输出的平均功率为 360mW,用示波器测得输出信号脉冲宽度为 19ns,对应的峰值功率为3.8kW,放大增益达到 43.8dB。图中未发现增益饱和的情况,输出功率和放大增益主要受抽运光功率的限制。

放大输出脉冲激光的光谱如图 4 所示。从图中可

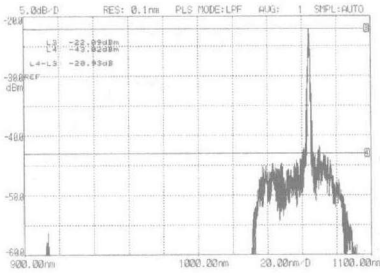


Fig. 4 The spectrum of the output laser

以看出,输出激光光谱中除 1064nm 的信号光外,还存在 915nm 波长的抽运光,但这部分光所占比例非常小,两者相差约 35dB,说明抽运光功率的吸收比较彻底。放大激光的信噪比约为 21dB。由于所使用的光纤较短,且纤芯直径较大,实验过程中激光峰值功率也不是太高,没有观察到受激布里渊散射等非线性效应。

由于光隔离器具有较大的插入损耗(1.5dB),为了提高第 3 放大级的信号输入功率,实验中曾尝试将第 3 放大级之前的光隔离器去掉,而把第 2 放大级改为后向抽运结构。当 1 级和 2 级抽运光功率分别为 150mW 和 120mW、第 3 级 LD 工作在 5A 时,测得输出激光平均功率为 405mW,虽然比之前第 2 级前向抽运加隔离器的方案输出功率高,但是功率抖动较明显;工作大约 4min 后,输出功率突然大幅降低,后经检测发现 2 级抽运 LD 损毁。这主要是由于第 2、第 3 放大级之间没有光隔离器造成的。第 3 放大级工作时,光纤中的后向传输光会有较强的放大自发辐射光成分,这部分光没有经过隔离滤除直接回到第 2 放大级的掺镱光纤中;同时由于后向抽运结构,第 2 放大级的掺镱光纤末端有最强的抽运光功率,会将 ASE 最大程度的放大,造成自发辐射光的自生激光振荡^[9]。WDM 980nm 端对这部分光(主要在 1030nm 附近)没有足够的隔离度,导致 2 级抽运 LD 损毁。

根据实验结果,把放大器的信号输入和输出端制作成 FC/APC 接头,分别作为信号输入尾纤和激光输出尾纤。通过结构设计,完成了一台全光纤结构的脉冲放大器样机,如图 5 所示,其最大外型为 320mm × 300mm × 110mm。

利用此封装好的脉冲放大器样机,对中心波长 1053nm、重复频率 1Hz、脉冲宽度 2.2ns、光谱 3dB 谱宽度 20nm、峰值功率 262mW 的激光信号进行了放大实验。在放大器 1 级、2 级抽运光功率分别为 170mW

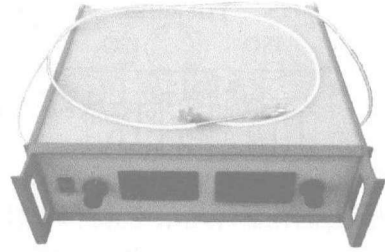


Fig. 5 The prototype of the pulse fiber amplifier

和 130mW,3 级抽运电流 7.0A 的情况下,获得了峰值功率 5kW 的激光输出,信号增益达到 43.2dB。图 6 是 3 级抽运电流和放大总增益的关系图。放大过程虽

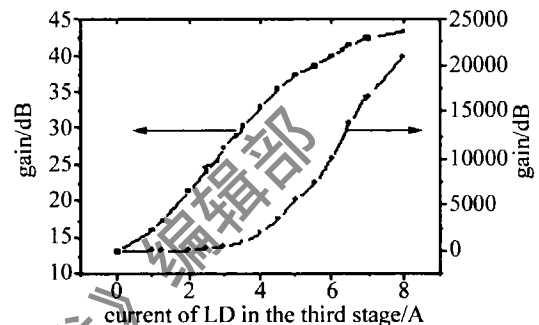


Fig. 6 The low repetition frequency signal gain vs. the current of the third stage

然没有出现增益饱和的情况,但有增益饱和的趋势。随抽运光功率的增大,反转的上能级粒子数逐渐增多,因信号的低重复频率特性(1Hz),受激辐射过程不能完全消耗这部分上能级粒子,使上能级粒子的积聚现象越来越严重,ASE 也越来越明显,从而限制了信号增益。

3 小结

利用大模场面积的掺镱双包层光纤,通过 MOPA 技术,优化结构设计,研制出一台 3 级级联、全光纤结构的脉冲光纤放大器样机。为了提高放大器的输出增益和信噪比,对各放大级抽运光功率大小及 2 级抽运结构进行了实验优化。该放大器可实现低频小功率信号的高放大增益。当输入信号中心波长 1064nm、重复频率 5kHz 时,获得了脉冲宽度 19ns、平均功率 360mW、峰值功率 3.8kW 的输出激光,放大增益达 43.8dB。利用该放大器对重复频率 1Hz 的脉冲激光进行了放大实验,也得到了 43.2dB 的输出信号增益。为了满足后续放大对信号的要求,以便获得更高峰值功率的低频脉冲激光输出,需要采用声光开关和带通滤波器等元器件对该放大器进行结构优化,以提高该放大器的输出信噪比。

参考文献

- [1] LOU Q H,ZHOU J,KONG L F, *et al.* Recent progress of high power pulsed double cladding fiber lasers [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(4): 510-515 (in Chinese).

(下转第 469 页)

Table 1 The optimal parameters of difference frequency type II (B) phase-matched BIBO crystal

signal light/ μm	ideal light/ μm	$d_{\text{eff}}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	angle $\varphi/(\circ)$	temperature $T/^\circ\text{C}$	acceptance angle $(\Delta\varphi \cdot l)/(\text{mrad} \cdot \text{cm})$	acceptance temperature $(\Delta T \cdot l)/(\text{cm} \cdot \text{C})$
0.671	2.568	1.925	34	22	6.63	2.9
0.6758	2.5	2.014	29.5	21.5	6.98	3.4
0.7	2.217	2.289	2.2	79.5	76.79	5.1
0.7248	2.0	2.289	2	213	73.2	2.05
0.8	1.588	2.289	1.6	335	55.85	0.8
0.8244	1.5	2.29	1.18	352.5	41.02	0.7

高,很难实用化;信号光为 0.7 μm 的纯红光时, d_{eff} 达到最大,允许角明显增大,只是它的匹配温度高于室温。

4 结论

在考虑晶体的结晶学主轴、压电主轴和折射率主轴的基础上,结合色散方程、热光方程,计算了 BIBO 晶体非临界相位匹配的非线性光学特点,通过以上计算结果和对比分析,可得出以下几点结论:(1)532nm 抽运时,BIBO 只有差频的 I 类和 II (B) 类可以实现非临界相位匹配,且可以实现 0.65 μm ~ 3.0 μm 的温度调谐。(2)信号光为 670nm 时,BIBO 的最佳匹配方式为 II (B) 类,选 $\varphi = 35^\circ$,则 $d_{\text{eff}} = 1.904\text{pm}/\text{V}$,匹配温度 $T_m = 22.3^\circ\text{C}$,允许温度 $(\Delta T \cdot l) = 2.85^\circ\text{C} \cdot \text{cm}$,允许角度 $(\Delta\varphi \cdot l) = 6.65\text{mrad} \cdot \text{cm}$ 。(3)BIBO 的非临界相位匹配可以利用 532nm 的绿光,差频产生 670nm 的红光,有望可以在激光电视技术等可见光范围内的广泛利用。

参考文献

[1] WANG Z P, TENG B, DU C L, *et al.* Frequency doubling property of the low symmetric nonlinear optical crystal BIBO [J]. *Acta Physica*

Sinica, 2003, 52(9): 2176-2184 (in Chinese).

- [2] LI Ch Y, WANG Y G, HUANG L. Extra cavity 660nm SHG study of type-I noncritical phase-matched LBO crystal [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5): 428-430 (in Chinese).
- [3] TENG B, WANG J Y, DONG S M, *et al.* Determining the optical growth orientation of BiB_3O_6 crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2004, 33(5): 751-754 (in Chinese).
- [4] HELLWING H, LIEBERTZ J, BOHATY L. Exceptional large nonlinear optical coefficient in the monoclinic bismuth borate BiB_3O_6 [J]. *Solid State Communication*, 1999, 109(4): 249-251.
- [5] HELLWING H, LIEBERTZ J, BOHATY L. Linear optical properties of monoclinic bismuth borate BiB_3O_6 [J]. *J A P*, 2000, 88(1): 240-244.
- [6] WANG Z P, DU C L, TENG B, *et al.* Third harmonic generation property of 1064nm in nonlinear optical crystal BiB_3O_6 of low symmetry [J]. *Acta Optical Sinica*, 2003, 23(11): 1300-1305 (in Chinese).
- [7] ZHANG K C, CHEN X A, WANG X X. Review of study on bismuth triborate (BiB_3O_6) crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2005, 34(3): 438-443 (in Chinese).
- [8] UMEMURA N, MIYATA K, KATO K. New data on the optical properties of BiB_3O_6 [J]. *Optical Materials*, 2007, 30(4): 532-534.
- [9] YAO J Q, XU D G. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 674-684 (in Chinese).
- [10] WANG J, YAO J Q, LI X F. Amendatory calculation of the acceptance parameters in three-wave interactions [J]. *Acta Optical Sinica*, 2001, 21(2): 139-141 (in Chinese).

(上接第 454 页)

- [2] DUAN Y F, HUANG B C, ZHANG P, *et al.* Experimental study of the all-fiber pulse fiber amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(10): 1379-1382 (in Chinese).
- [3] WRIGHT M W, VALLEY G C. Yb-doped fiber amplifier for deep-space optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(3): 1369-1374.
- [4] PHILIPPOV V, CODEMARD C, JEONG Y. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2590-2592.
- [5] CHENG M Y, CHANG Y C, GALVANASKAS A, *et al.* High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200mm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(4): 358-360.
- [6] TEODORO F D, BROOKS C D. Fiber sources reach multimewatt peak power in ns pulses [J]. *Laser Focus World*, 2006, 42(11): 94-98.
- [7] YE C G, YAN P, GONG M L, *et al.* Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(5): 249-250.
- [8] DU S T, ZHOU J, ZHANG F P, *et al.* 20W average power, high repetition rate, nanosecond pulse with diffraction limit from an all-fiber MOPA system [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(10): 2546-2549.
- [9] ZHAN Y, ZHENG Y, ZHAO Y H, *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).