

文章编号: 1001-3806(2011)02-0145-03

1550nm 单频脉冲光纤激光放大器实验研究

何幸锴¹, 侯辉², 冯力天¹, 伍波¹, 沈琪浩¹, 侯天晋¹, 兰戈^{1*}, 周鼎富¹

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 陆航驻成都地区军事代表室, 成都 610041)

摘要: 为了满足相干探测技术对激光光源的需求, 采用主振功率放大技术, 对全光纤、高重复频率、1550nm 单频脉冲光纤激光器进行了研究。得到了脉冲宽度 400ns、重复频率 10kHz、单脉冲能量 14μJ、平均功率 148mW 的单模光纤激光脉冲输出。实验中还发现了光纤中过高的功率密度所引起的受激布里渊散射(SBS)将导致激光脉冲波形的变形。提出了抑制 SBS 效应、提高输出功率的方法。结果表明, 单频脉冲放大过程中, SBS 效应是阻碍功率提高的主要因素, 必须抑制 SBS 效应才能提高输出功率。

关键词: 激光技术; 光纤激光放大器; 主振功率放大; 单频; 受激布里渊散射

中图分类号: TN722; TN253

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.001

Experimental study of 1550nm single frequency pulsed fiber laser amplifiers

HE Xing-kai¹, HOU Hui², FENG Li-tian¹, WU Bo¹, SHEN Qi-hao¹, HOU Tian-jin¹, LAN Ge¹, ZHOU Ding-fu¹

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Military Deputy of Aero-Army in Chengdu, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to meet the requirements of coherent detection, a high power, single frequency, 1550nm pulsed fiber laser was studied based on all-fiber master oscillator power amplifier technique. A single mode pulsed laser was obtained with 400ns pulse duration, 10kHz pulse repetition rate, 148mW average power and 14μJ pulse energy. It was also found that the pulse shape was destroyed by the stimulated Brillouin scattering (SBS) resulting from the higher power density in the fiber. Then a way was put forward to suppress the SBS effect. The experimental results show that the SBS must be suppressed in order to improve the power.

Key words: laser technique; fiber laser amplifier; master oscillator power amplifier; single frequency; stimulated Brillouin scattering

引言

随着激光技术以及相干探测技术的发展, 窄线宽、高功率的激光器开始受到人们的普遍关注, 并逐渐成为研究热点, 且在激光测风雷达、激光水听器、光纤陀螺仪等新型探测仪器中得到了广泛的应用。相比固体单频激光器和稳频 CO₂ 激光器, 单频光纤激光器具有小型模块化、可靠性高、寿命长、热管理简单、使用灵活及维护方便等特点, 是实现窄线宽、高功率激光输出的最佳选择。1550nm 激光波长对人眼相对安全, 更适合实际中的应用, 因此得到了更快的发展。国外已有相关的报道^[1-4], 国内也开始进行相关的研究^[5]。作者研究的 1550nm 单频脉冲光纤激光放大器是采用主振功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)技

术, 将窄线宽、高光束质量的连续种子光调制成脉冲信号, 然后进行级联放大, 实现窄线宽、高功率激光的脉冲输出。

1 系统描述

研制的光纤激光放大系统采用全光纤脉冲放大结构, 系统结构示意图如图 1 所示, 由种子源、预放大级、

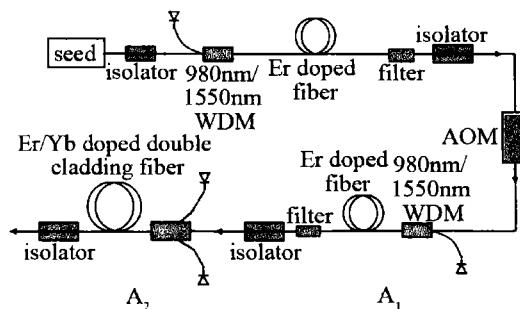


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

调制系统和两级功率放大器组成。

种子源采用带尾纤的分布反馈式半导体(distributed feedback, DFB)稳频激光器, 输出功率 8mW, 线宽

作者简介: 何幸锴(1985-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光纤激光放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: office@xiwu.net

收稿日期: 2010-07-13; 收到修改稿日期: 2010-08-02

约 50kHz, 中心波长 1550.2nm。预放大级采用单模掺铒光纤放大器, 其抽运源采用单模尾纤输出的波长 980nm、功率 300mW 的半导体激光器; 信号光和抽运光通过波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 器耦合到放大光纤中。调制系统采用声光调制器 (acoustic-optic modulator, AOM), 其移频量为 40MHz, 调制脉宽 400ns, 上升沿 100ns, 重复频率 10kHz。第 1 级放大器 A_1 采用和预放一样的单模掺铒光纤放大器。第 2 级放大器 A_2 采用纤芯尺寸为 7/125 μm 的铒镱共掺双层包层光纤, 光纤长度 2m; 抽运源采用单只输出功率 0W~5W 的半导体激光器, 多模尾纤输出, 中心波长 980nm。各级之间采用滤波器和隔离器实现级间分隔。

连续种子光注入到预放大级中放大, 将种子光放大到 60mW。该级放大器的主要目的是提高进入调制器的信号功率, 使声光调制后有较强的信号进入下一级放大器, 这样可以降低自发辐射噪声。从种子源出来的信号光在注入放大器前加入一隔离器, 防止放大器后向散射回波对种子源造成影响和损伤。经过声光调制后的脉冲信号送入 A_1 放大器和 A_2 放大器中进行功率放大后输出。

2 实验结果

种子光信号通过预放大器后被放大到 60mW, 再经过声光调制器得到重复频率 10kHz, 脉宽 400ns 的脉冲信号, 其平均功率 0.1mW, 峰值功率 25mW, 脉冲能量 10nJ, 波形如图 2 所示。脉冲信号通过波分复用

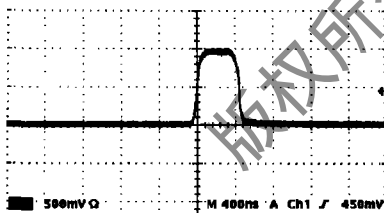


Fig. 2 Shape of the seed pulse

器送入放大器 A_1 , 在抽运功率为 300mW 的情况下, 得到平均功率 22.8mW 的输出信号。

在第 2 级放大器, 抽运激光器的输出功率调到 2.5W, 此时, 输出信号的平均功率为 148mW, 其脉冲峰值功率约为 40W, 脉冲能量 14 μJ , 输出脉冲波形如图 3 所示。可以发现脉冲波形发生了一定的变化, 其前沿

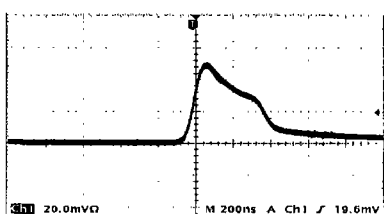


Fig. 3 Shape of the amplified pulse

明显高于后沿, 出现这种情况的原因是脉冲的前沿消耗了大量的上能级粒子数, 使放大光纤中的上能级粒子数减少, 脉冲后沿的增益逐渐降低, 因此, 脉冲前沿得到的增益大于后沿^[6]。

继续增大抽运功率到 5W, 此时, 输出平均功率为 318mW, 输出波形如图 4 所示, 相对于图 3 的完好波

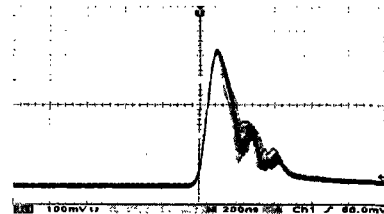


Fig. 4 Shape of the pulse destroyed by SBS

形, 每个脉冲上出现了周期性的震荡。出现这种情况的原因是功率密度太高的脉冲信号激发了受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 效应^[7-9], 弛豫振荡的反向斯托克斯波导致输出脉冲信号也产生相应的弛豫振荡。针对这种由 SBS 效应引起的现象, 后面将进行较详细的分析。

3 激光器频率线宽测量

为了对放大前后激光线宽的变化情况进行对比分析, 采用延时自外差的方法, 准确测量了种子源线宽和输出平均功率放大到 148mW 时的激光线宽。

延时自外差是将连续种子光的一部分进入延时光纤, 另一部分经过声光调制, 然后两部分激光混频后由探测器接收, 然后送入示波器进行处理^[9]。线宽测量系统如图 5 所示, 测得的频谱如图 6 所示。

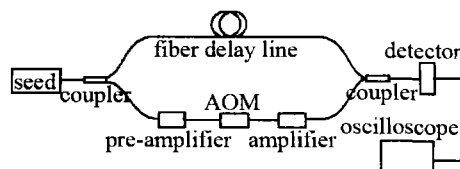


Fig. 5 Measurement setup for frequency line-width of fiber laser

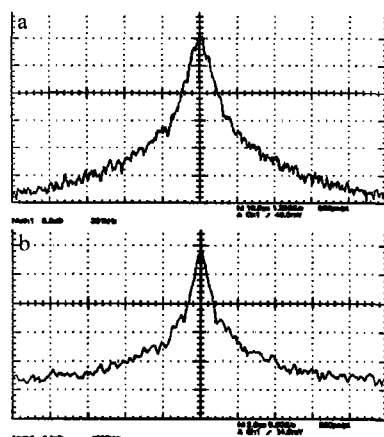


Fig. 6 a—spectrum line-width of the seed pulse b—spectrum line-width of the amplified signal

经测量,种子源线宽为 55kHz,放大后的线宽为 100kHz,激光的线宽有一定展宽,展宽的原因是中心频率的光子增益饱和后,边频的光子还没有饱和,还会继续放大^[5]。

4 窄线宽放大过程中的 SBS 效应及抑制方法

对于脉冲光纤激光器,脉冲峰值功率较高,容易激发非线性效应。在各种非线性效应中,受激布里渊散射的峰值增益 g_B 很高,增益频谱 $\Delta\nu_B$ 很窄(约 10MHz)。当激光线宽小于布里渊增益频谱 $\Delta\nu_B$ 时,SBS 阈值很低;当激光线宽远大于 $\Delta\nu_B$ 时,峰值增益降低,SBS 阈值很高^[7]。因此,在窄线宽放大过程中,SBS 阈值很低,容易激发 SBS 效应。

对于单频脉冲激光,光纤中高峰值功率的脉冲信号将作为抽运光激发 SBS 效应产生反向斯托克斯波,SBS 过程的动态特性可以由下式确定:

$$\partial I_s / \partial z + (1/v_g) \partial I_s / \partial t = -g_B I_s I_s - \alpha I_s \quad (1)$$

$$-\partial I_s / \partial z + (1/v_g) \partial I_s / \partial t = -g_B I_s I_s - \alpha I_s \quad (2)$$

式中, I_s 为信号光强度, I_s 为反向斯托克斯波强度(其传输方向为 $-z$ 方向), α 为损耗系数, g_B 为增益, v_g 为光纤中的光速。由(1)式可知,信号光强 I_s 由于能量转换为斯托克斯波而衰减,其衰减系数与斯托克斯光强 I_s 成正比;由(2)式可知,斯托克斯光强 I_s 在反向传输过程中将被放大,其增益系数与正向传输的信号光强 I_s 成正比。

对应每个信号脉冲,反向斯托克斯波将呈现弛豫振荡的特征,振荡的周期等于 $2T$,其中 $T = nL/c$ 是长度为 L 的光纤的渡越时间, n 为光纤折射率, c 为真空中的光速^[7]。1987年, LICHTMAN 等人在实验中观察到了振荡的斯托克斯波^[10],其波形如图 7 所示。正是

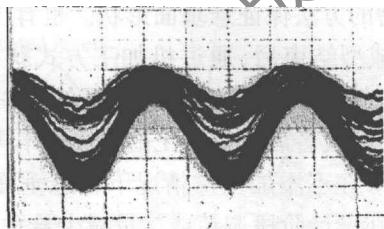


Fig. 7 Oscillations in the Stokes wave

由于斯托克斯波的这种振荡,导致图 4 输出脉冲波形的振荡,信号光由于被斯托克斯波吸收能量而呈现相应的弛豫振荡特征,由于脉冲信号有 100ns 的上升沿,在上升到阈值水平后激发 SBS 效应,所以振荡的第 1 个波峰较后面的波峰宽一些。

由于 SBS 效应会吸收信号光能量从而导致信号输出功率降低,还会引起信号脉冲波形的变形,因此,必须提高 SBS 阈值、抑制 SBS 效应,提高信号输出功

率。为了研究放大光纤中的 SBS 阈值特性,做了两组对比实验,分别比较了在 SBS 阈值情况下(以信号脉冲波形被破坏为标志),不同放大光纤长度对应的输出功率,以及不同输入功率对应的输出功率。实验结果如表 1 和表 2 所示。

Table 1 Output power of SBS threshold in different fiber length

group	fiber length/m	input power/mW	output power/mW
1	2	22.8	148
2	5	22.8	53

Table 2 Output power of SBS threshold at different input power

group	fiber length/m	input power/mW	output power/mW
1	2	22.8	148
2	2	44.2	104

表 1 的结果表明:放大光纤越长,SBS 阈值越低,越容易发生受激布里渊散射,缩短光纤长度则能提高 SBS 阈值。表 2 的结果表明:放大光纤中,输入功率较小的情况下,输出功率可以更高,而输入功率较大时,较低水平的输出功率就激发了 SBS 效应。从(2)式可知,在输入功率较小的情况下,即使光纤输出端有较大的功率激发了反向斯托克斯波,由于在光纤前端得不到足够的增益,反向斯托克斯波无法充分放大,从而抑制了 SBS 效应。

但上述结果不能说明输入信号功率越小越好,因为如果输入功率太小,就需要更大的增益,而放大光纤的增益是有限的。放大光纤的增益与光纤长度成正比,同时,光纤长度与 SBS 阈值成反比,所以,在保证光纤增益的前提下要尽量缩短光纤长度,因此,放大能力强的高掺杂光纤将是最好的选择。

5 小结

搭建了 1550nm 单频脉冲光纤激光放大器系统,实现了重复频率 10kHz、脉宽 400ns、平均功率 148mW 单频脉冲输出。采用延时自外差的方法,测量了输出激光的线宽。研究了放大光纤中的 SBS 效应,发现在不激发 SBS 效应的情况下,选择合适的输入信号功率可以得到较高输出功率。

参考文献

- [1] PHILIPPOV V, CODEMARD C, JEONG Y, *et al.* High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2590-2592.
- [2] CODEMARD C, FARRELL C, PHILIPPOV V, *et al.* 1mJ narrow linewidth pulsed fiber MOPA source at 1535nm[C]//Lasers and Electro-Optics Europe 2005 CLEO/Europe 2005 Conference. Munich, Germany: Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005: 521.
- [3] CANAT G, LOMBARD L, DURÉCU A, *et al.* Er-Yb-doped LMA fiber structures for high energy amplification of narrow linewidth pulses

形,得出翘曲程度与扫描线的长度成正比关系,提出可以采用分区扫描的方法防止大的翘曲变形和裂纹。

上述分析了影响悬垂结构成型相对比较重要的几点因素,包括倾斜角 θ 、扫描速率和扫描线长度。还有一些因素对悬垂面成型影响也较大,如激光功率、扫描策略、支撑添加的方式、零件空间位置摆放等。限于文章的篇幅,并不能对这些影响因素逐一详细讨论。所有这些影响因素在不同条件下,对悬垂结构成型质量将产生主要或者次要的影响。目前解决悬垂面成型缺陷的方法主要为添加支撑。作者提出根据悬垂面的位置,通过局部的参量控制来优化其成型质量。当SLM成型到悬垂面(特别是第1层出现的时候),扫描速率或者激光功率在扫描过程实时变化,根据悬垂面倾斜角 θ 大小适当的提高扫描速率或者降低激光功率以减小能量输入,减小翘曲变形趋势和挂渣量。图6是典

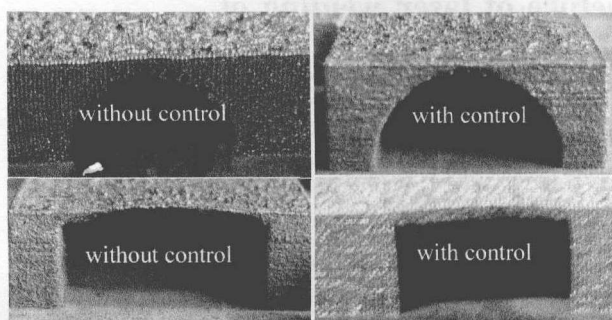


Fig. 6 Contrast of local parameters optimization in building overhanging surface

型的悬垂面是否施加了局部参量控制后的成型效果比较,从图中可以发现,经过局部参量控制后悬垂结构成型质量明显改善许多。

3 结论

悬垂面是SLM方法成型金属零件固有的几何限制。实验讨论倾斜角度、扫描速率、扫描线长度对悬垂面成型质量的影响。倾斜角度 θ 越小悬垂结构越难以精确成型。扫描速率越小,悬垂结构越容易翘曲。扫

描速率与最小成型角度相互制约。长扫描线更有利于悬垂结构应力累计,进而导致严重翘曲发生。实验通过局部参量控制后,能够明显的改善悬垂结构的成型质量。

本文内容为SLM技术的前期设计提供了重要依据:必须考虑最小成型角度和加工参量的关系。对于如 $\theta=0^\circ$ 这样特殊的悬垂结构,即使在添加支撑的情况,也并不能保证其顺利成型。

一些未在本文中讨论的因素,如支撑的添加方式、激光功率等对悬垂结构的成型也很重要。为了尽量准确地成型悬垂结构,SLM实验前需要综合的考虑大多数的因素达到最优化。

参考文献

- [1] KRUTH J P, VANDENBROUCKE B, VANDENBROUCKE J, *et al.* Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques[DB/OL]. (2005-04-20). <http://en.scientificcommons.org/21374842>.
- [2] WANG D, YANG Y Q, WU W H, *et al.* Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3233-3239 (in Chinese).
- [3] KRUTH J P, MERCELIS P, VAN VAERENBERGH J, *et al.* Feed-back control of selective laser melting [DB/OL]. (2008-02-17). <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/185342/1/krufcs.pdf>.
- [4] YASA E, CRAEGHS T, BADROSSAMAY M, *et al.* Rapid manufacturing research at the catholic university of Leuven[DB/OL]. (2009-09-17). https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/245245/1/Yasa_RMRResearchKUL_RapidTech09.pdf.
- [5] YADROITSEV I, BERTRAND Ph, SMUROV I. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8064-8069.
- [6] MUMTAZ K A, ERASENTHIRAN P, HOPKINSON N. High density selective laser melting of Waspaloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195(1/3): 77-87.
- [7] WANG D, YANG Y Q, HUANG Y L, *et al.* Impact of inter-layer scan strategy on quality of direct fabrication metal parts in SLM process[J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 447-451 (in Chinese).
- [8] MATSUMOTO M, SHIOMI M, OSAKADA K. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid Prototyping by selective laser processing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(1): 61-67.

(上接第147页)

- at 1.5 μm [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore, America: Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007: CTuBB1.
- [4] LEIGH M, SHI W, ZONG J, *et al.* High peak power single frequency pulses using a short polarization-maintaining phosphate glass fiber with a large core[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(18): 181108/1-181108/3.
- [5] LIU Y, LIU J Q, CHEN W B. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent Doppler wind lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1857-1860 (in Chinese).
- [6] ZHANG P, DUAN Y F, HUANG B, *et al.* Experimental study about all-fiber high-gain pulse fiber amplifiers[J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 452-454 (in Chinese).
- [7] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 222-240 (in Chinese).
- [8] ZHOU L, NING J P, CHEN Ch, *et al.* Stimulated Brillouin scattering in Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers [J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 482-485 (in Chinese).
- [9] WU B. The research on 1.5 μm erbium-doped narrow line-width fiber laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 25-30 (in Chinese).
- [10] LICHTMAN E, FRIESEM A A, WAARTS R G, *et al.* Stimulated Brillouin scattering excited by two pump waves in single-mode fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1987, 4(9): 1397-1403.