

亚纳秒脉宽掺镱光纤放大器及其倍频特性研究

王子薇^{1,2} 杜松涛¹ 何晶^{1,2} 王兆坤^{1,2} 周军¹ 魏运荣¹ 孟俊清¹ 李骁军³

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全国固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 上海飞博激光科技有限公司, 上海 201807)

摘要 以被动调 Q 的小型 Nd:YAG/Cr³⁺:YAG 激光器为种子光源, 以后向抽运的掺镱双包层光纤为功率放大介质, 经过一级光纤功率放大, 获得了平均功率 5.5 W, 重复频率 9 kHz 的激光输出, 脉冲宽度为 575 ps, 峰值功率达到 1 MW。采用非临界相位匹配的 LBO 晶体, 对该亚纳秒脉宽光纤放大器进行了单通倍频实验研究。当晶体温度为 150.5 °C、基频光功率为 2.7 W 时, 获得了平均功率 1.3 W、峰值功率 250 kW 的倍频绿光输出, 倍频转换效率为 48%。

关键词 激光器; 脉冲光纤放大器; 主振荡功率放大; 三硼酸锂晶体; 倍频

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0802005

Sub-Nanosecond Yb-Doped Fiber Amplifier and Its Second Harmonic Generation Characteristics

Wang Ziwei^{1,2} Du Songtao¹ He Jing^{1,2} Wang Zhaokun^{1,2} Zhou Jun¹
Wei Yunrong¹ Meng Junqing¹ Li Xiaojun³

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Shanghai Feibo Laser Technologies Co. Ltd., Shanghai 201800, China

Abstract A Q-switched Nd:YAG/Cr³⁺:YAG laser is used to seed a one-stage amplifier featuring backward pumped Yb-doped double-cladding fiber as the power amplifier. Average power of 5.5 W with repetition rate of 9 kHz is achieved, corresponding to pulse duration of 575 ps and peak power of 1 MW. Based on the fiber amplifier at 2.7 W, 1.3 W green laser is obtained by single-pass frequency doubling using non-critical phase matching LBO crystal at 150.5 °C, and its peak power reaches 250 kW, with conversion efficiency of 48%.

Key words lasers; pulse fiber amplifier; master oscillator power amplifier; LBO crystal; frequency doubling

OCIS codes 060.2320; 140.3515; 190.4370

1 引言

高功率、短脉冲宽度的绿光激光在材料加工^[1]、医疗卫生^[2]、激光显示^[3]和光学参量振荡器(OPO)抽运源^[4]等多个领域具有巨大的应用前景。采用基于主振荡-功率放大(MOPA)技术的光纤放

大器所得到的绿光具有转换效率高、光束质量好、输出功率高、工作稳定等一系列优点^[5], 拥有很大的研究价值和应用前景。2005年, Liu等^[6]报道了电调制的激光二极管(LD)经过二级放大获得了重复频率 10 MHz, 脉冲宽度 5 ns, 平均功率 110 W 的窄线

收稿日期: 2012-11-07; 收到修改稿日期: 2013-03-20

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030201)、国家自然科学基金(60908011, 60907045)、国家重大科技专项(2010ZX04013)

作者简介: 王子薇(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率脉冲光纤激光技术方面的研究。E-mail: wzw@siom.ac.cn

导师简介: 周军(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

宽、线偏振激光输出,经过两块串联的长度分别为 25 mm 的三硼酸锂(LBO)晶体,通过非临界相位匹配方式获得了平均功率 60 W 的绿光输出,倍频效率达到了 54.5%,实现了光纤激光倍频突破性的进展,但该实验所获得绿光峰值功率仅为 2.4 kW,难以满足实际应用的需求。此后,脉冲光纤激光倍频逐渐向着高功率、短脉冲宽度的方向逐渐发展。2006 年,Babushkin 等^[7]通过对短脉宽 LD 种子源三级光纤功率放大,获得了平均功率 46 W 的激光输出,重复频率为 1.8 MHz,脉冲宽度为 1.3 ns,通过 LBO 晶体倍频获得了平均功率 30 W 的倍频绿光,倍频效率达到 68%,这也是迄今为止光纤激光单通倍频的最高转换效率。2010 年,Alam 等^[8]使用增益开关方式的皮秒级脉宽单模 LD 作为种子光源,经过三级光纤功率放大后获得了脉冲宽度 20 ps、重复频率 910 MHz、输出平均功率 100 W 的激光,通过 LBO 晶体单通倍频后,输出绿光平均功率为 56 W,峰值功率也仅为 3 kW。在国内,2009 年,Yu 等^[9]采用被动锁模激光器作为种子源,以掺镱光子晶体光纤为放大器,通过一级功率放大获得了窄谱宽、线偏振、平均功率 40.2 W 的激光输出,重复频率为 100 MHz,脉冲宽度为 30 ps,通过 LBO 晶体单通倍频获得了 17.3 W 的绿光输出,倍频效率为 43%,绿光峰值功率为 5.8 kW。

上述报道中的脉冲光纤激光倍频研究大多集中在脉宽数十皮秒、重复频率兆赫兹以上,虽然获得了较高平均功率的绿光激光,但单脉冲能量较小,放大激光的峰值功率基本上小于百千瓦量级;同时,由于上述报道中的种子光源的功率较小,大多采用多级光纤级联放大的结构,系统结构较为复杂。针对以上问题,为实现较大脉冲能量、高功率的绿光激光,本文对亚纳秒脉宽、较低重复频率的高功率光纤放大器及其倍频特性进行了研究。以脉冲宽度 420 ps,重复频率 9 kHz 的被动调 Q 的薄片激光器作为种子源,采用端面后向抽运 MOPA 结构,通过一级光纤放大获得了最大平均功率 5.5 W、峰值功率超过 1 MW 的 1064 nm 激光输出。采用温度相位匹配的 LBO 晶体以外腔单通倍频的方式进行倍频,获得了峰值功率达 250 kW 的绿光激光输出。

2 亚纳秒脉宽光纤放大器的实验研究

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。种子源采用一台带尾纤输出的 Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 复合晶体被动调 Q 激

光器(MO),其具有结构紧凑、输出功率高等特点,可以大大减少光纤放大级数,从而降低系统的复杂性。该激光器通过隔离器(ISO)和透镜 f₁ 后,耦合进入输出光纤中。种子光源尾纤与增益双包层光纤直接熔接,在增益光纤的前端,采用抽运滤除技术将增益光纤内包层中剩余抽运光滤除。实验采用一段 2.5 m 长的八边形双包层高掺杂掺镱光纤(YDCF)作为增益介质,纤芯直径/内包层直径为 50/400 μm,纤芯/包层有效数值孔径为 0.13/0.45,包层对 976 nm 抽运光的吸收效率为 6 dB/m。为了避免高功率下的光纤端面损伤以及抑制放大过程中端面菲涅耳反射引起的放大自发辐射(ASE),将光纤输出端熔接上带斜角(8°)的端帽。光纤输出的高功率半导体抽运源(LD)产生的中心波长 976 nm 的抽运光经透镜 f₃ 准直后通过平面镜 L₁ 和 L₂。L₁ 是对抽运光高透(HT)、信号光高反(HR)的 20°镜,防止高功率的放大信号光进入 LD 抽运源,对其产生损坏,L₂ (976 nm HR, 1064 nm HT)为 45°镜。抽运光被 L₂ 反射后经透镜 f₂ 反向抽运到增益光纤内,放大的信号光经 f₂ 准直后透过 L₂ 输出。输出的放大信号光经过格兰-泰勒(G-T)棱镜起偏,得到的线偏振光通过透镜 f₄ 聚焦到规格为 3 mm×3 mm×15 mm 的 LBO 晶体中心,该晶体放置在工作温度为 40 °C~180 °C、控制精度为 0.1 °C 的温控炉中。基频光聚焦进入 LBO 晶体单通倍频后,输出激光准直通过双色片 L₄ (1064 nm HR, 532 nm HT)分离剩余基频光,获得 532 nm 的倍频绿光激光输出。

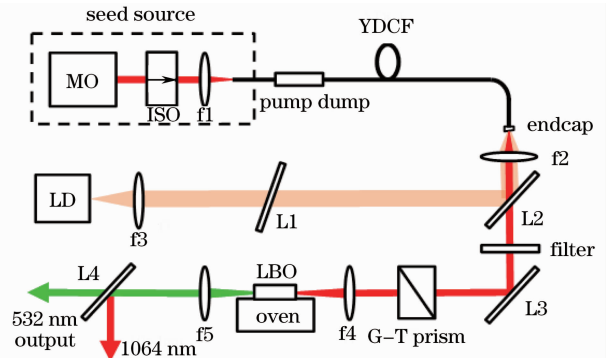


图 1 亚纳秒光纤放大器及其倍频装置图

Fig. 1 Experimental setup of sub-nanosecond fiber amplifier and frequency doubling

2.2 实验结果

首先分别采用光谱分析仪(Yokogawa AQ6370)和示波器(Tektronix TDS 6124C)测量了种子光的光谱和脉冲特性,如图 2 所示。种子光输

出平均功率为 260 mW, 中心波长为 1064.8 nm, 光谱带宽为 0.16 nm, 为双纵模输出。重复频率为

8.7 kHz, 脉冲宽度约为 420 ps。

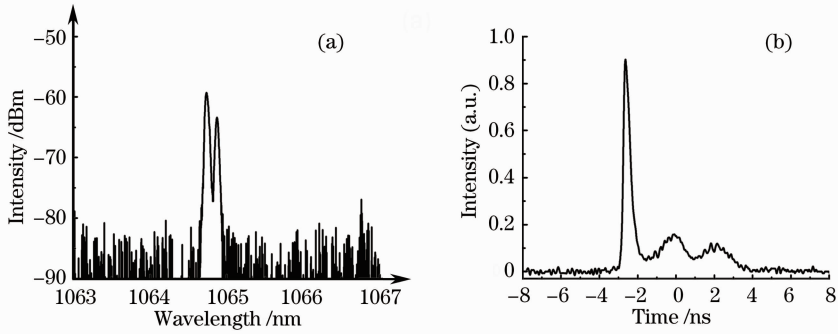


图 2 种子光的(a)光谱和(b)脉冲特性

Fig. 2 (a) Spectrum and (b) temporal profile of seed source

图 3 为信号光输出功率随抽运功率变化的关系。当抽运功率为 19 W 时, 信号光最大输出平均功率为 5.5 W。光纤放大器的输出功率随着抽运功

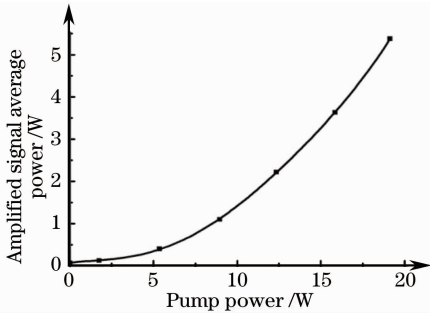


图 3 输出信号光平均功率随抽运光功率的变化关系

Fig. 3 Average output power of signal laser versus pump power

率的增加而不断增加, 当抽运功率大于 10 W 时, 斜率效率上升到 50% 以上。这是由于随着抽运功率的提升, 抽运激光波长向 976 nm 漂移, 使得抽运转换效率提升。由图 3 可知, 光纤的吸收尚未饱和, 可以通过继续增大抽运功率来提高输出功率。

图 4 给出了在信号光激光输出平均功率为 5.5 W 时, 通过光谱分析仪测量的输出激光光谱与光谱精细结构。放大激光的中心波长在 1064.8 nm, 光谱宽度(3 dB 带宽)为 0.15 nm, 没有观察到 ASE 和受激拉曼散射(SRS)、四波混频(FWM)等非线性现象。同时从图 4(b)可以看出, 相对于种子光的双纵模, 在放大过程中激光产生了新的纵模, 这是由高峰值功率下的自相位调制(SPM)效应引起的。

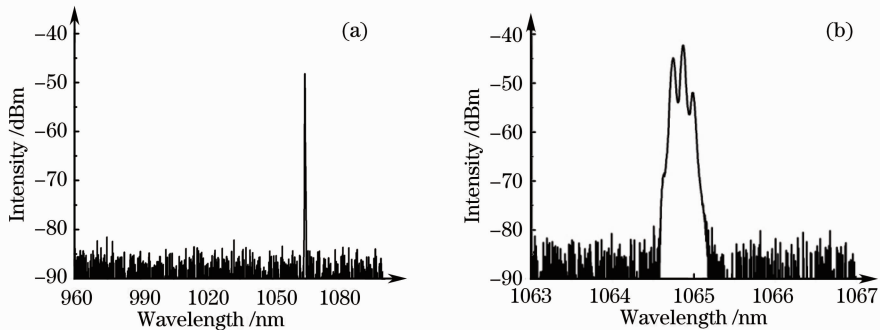


图 4 亚纳秒脉宽光纤放大器的(a)输出光谱和(b)光谱精细结构(输出功率 $P=5.5$ W)

Fig. 4 (a) Spectrum and (b) high-resolution scan of sub-nanosecond fiber amplifier (output power $P=5.5$ W)

同时测量了放大激光的脉冲特性, 脉冲波形和脉冲序列如图 5(a)和(b)所示。实验采用快速光电探测管获得输出信号光脉冲, 将其接入到 LeCroy Wavesurfer 104MXs 示波器显示输出脉冲波形。此

时脉冲宽度为 575 ps, 重复频率为 8.7 kHz, 脉冲峰值功率大于 1 MW。由于受测试设备的限制, 实际的脉冲宽度应该小于该测量值。

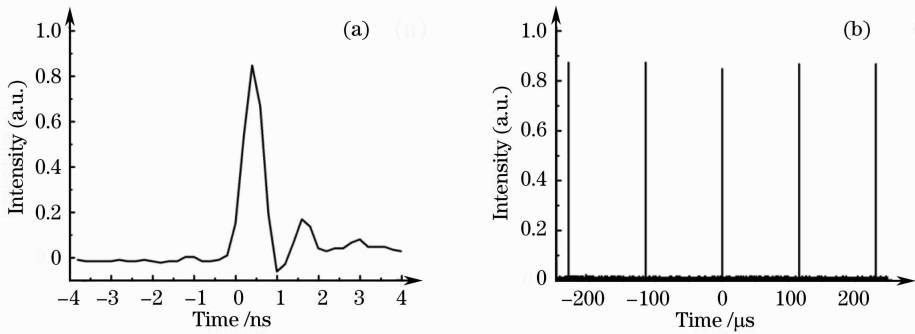


图 5 亚纳秒脉宽光纤放大器输出(a)脉冲波形和(b)脉冲序列图(输出功率 $P=5.5\text{ W}$)
 Fig. 5 (a) Pulse profile and (b) pulse sequence of fiber amplifier (output power $P=5.5\text{ W}$)

3 亚纳秒脉宽光纤放大器的倍频特性研究

LBO 晶体具有较高的非线性系数和高损伤阈值,是高峰值功率激光二次谐波产生(SHG)的理想晶体。使用温度相位匹配的方式,可以避免走离效应的影响,降低光束发散所引起的相位失配,获得更高的转换效率。本实验选用切割角 $\theta=90^\circ, \varphi=0^\circ$, 设计波长 1064 nm , 尺寸 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的 LBO 晶体,在晶体加热到 $149\text{ }^\circ\text{C}$ ^[10] 左右时,基频光可实现 I 类非临界相位匹配,产生绿光。为了与 LBO 晶体尺寸相对应,将输出光斑半径 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的基频光束通过准直聚焦系统,使其在晶体中心聚焦,聚焦光斑半径约为 $110\text{ }\mu\text{m}$,其对应的瑞利距离为 70 mm 。此时平面波近似下理论计算得到的倍频效率^[11] 约为 78% ,温度带宽^[12] $\Delta T=2.83\text{ }^\circ\text{C}$,角度带宽 $\Delta\theta=2.65^\circ$,光谱带宽 $\Delta\lambda=2.3\text{ nm}$ 。

倍频晶体温度的精确控制对于倍频转换效率及系统的稳定性十分重要。在基频光平均功率为 1.9 W 、晶体中心聚焦光斑半径约为 $110\text{ }\mu\text{m}$ 时,调节倍频晶体的温度,倍频绿光平均功率随控制温度的变化情况如图 6 所示。从图中可知,在 $150.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时晶体

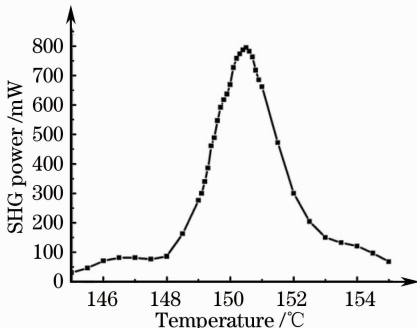


图 6 倍频光平均功率随温度的变化关系
 Fig. 6 Average SHG power versus temperature

达到最佳相位匹配温度,温度调谐半峰全宽(FWHM)为 $2.31\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于基频光的中心波长相对于 LBO 晶体设计的波长(1064 nm)偏高,所以为了补偿波长偏移造成的失配,最佳匹配温度应比理论计算的值要高^[13]。同时,晶体生长过程的不同、基频光的聚焦和晶体中热量的分布也会造成匹配温度不同。

图 7 中的实线和虚线分别表示了晶体中心聚焦光斑半径约为 $110\text{ }\mu\text{m}$ 时,倍频光平均功率和倍频转换效率与基频光功率的关系。随着基频光功率的提高,倍频光功率和转换效率不断增大,保持温度在 $150.5\text{ }^\circ\text{C}$,基频光功率为 2.7 W 时,输出倍频光功率为 1.3 W ,倍频转换效率达 48% 。相对于理论计算的倍频效率偏低,这是由于理论计算中计算的波数差 $\Delta k=0$,实际实验中的基频光功率损耗、位置误差、中心波长误差以及晶体中温度分布引起的失配都将导致倍频效率的下降。此时晶体内最大功率密度约为 0.42 GW/cm^2 ,远小于 LBO 晶体的损伤阈值 (10 GW/cm^2)^[10],并且在实验中没有出现饱和和现象,所以可以通过增加基频光功率或减小光斑束腰尺寸来提高转换效率。由于实验中采用的双包层

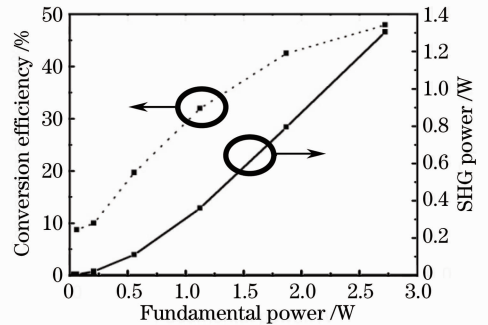


图 7 倍频转换效率和倍频光平均功率随基频光功率的变化关系
 Fig. 7 Conversion efficiency and average SHG power versus fundamental power

光纤为非保偏型的双包层光纤,放大输出激光为非偏振激光,从而使得通过格兰-泰勒棱镜起偏获得的线偏振激光仅约为光纤放大器输出功率的一半。通过采用保偏双包层光纤^[7]或者控制放大器中增益光纤的盘绕状态^[14],有望获得高偏振度的线偏振放大激光,这将明显提高整个系统的倍频效率和绿光输出功率。此外,倍频过程中使用的LBO晶体长度仅为15 mm,可以通过使用更长的晶体或者串联晶体来获得更高的倍频效率。

采用Ocean Optics HR2000光谱仪对输出绿光功率为1.3 W时的倍频光光谱分布进行测量,测得中心波长532.9 nm,光谱带宽0.55 nm。图8为LeCroy Wavesurfer 104MXs示波器测得的输出功率1.3 W时的倍频光脉冲波形,脉冲宽度541 ps,相对于基频光,脉冲宽度稍有变窄。同样,由于受测试设备的限制,此时实际的脉冲宽度应该小于测量值。

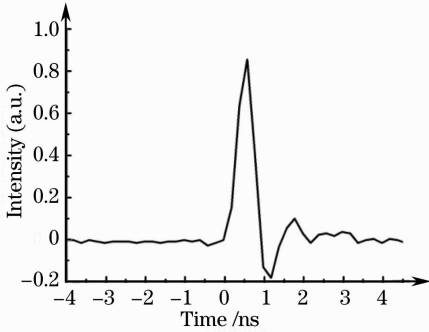


图8 倍频光输出脉冲波形图(输出功率 $P=1.3$ W)

Fig. 8 Pulse profile of SHG (when output power is 1.3 W)

使用PRIMES LQM-HP光束质量分析仪对倍频光的光束质量进行测量,得到绿光输出功率为1.3 W时,两个方向的光束质量因子分别为 $M_x^2=4.058$ 和 $M_y^2=4.743$,聚焦光斑随传播距离的变化关系如图9所示。输出光斑在 x 、 y 方向上的腰斑

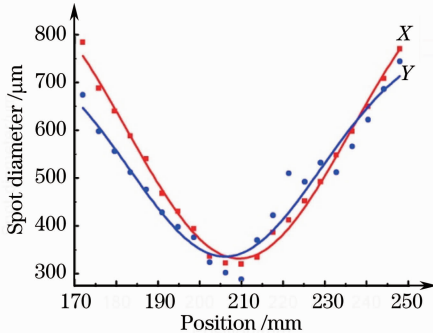


图9 输出光远场光斑随传播距离的变化

Fig. 9 Output laser spots in farfield versus transmission distance

半径和光束质量的差别是由于光纤输出端面为斜角而导致的。通过优化种子激光与放大光纤的耦合注入条件,或采用光子晶体光纤,将会显著提高输出激光的光束质量和倍频转换效率。

4 结 论

采用MOPA方式对被动调Q固体种子源进行了一级光纤功率放大,以半导体激光器后向抽运掺镱双包层光纤,在重复频率为9 kHz时获得了最大平均功率5.5 W、峰值功率高达1 MW的1064 nm激光输出,其脉冲宽度小于570 ps,光谱宽度约为0.15 nm。输出放大激光通过偏振分束器起偏后,通过LBO晶体进行单通倍频,在基频光平均功率2.7 W时,获得了平均功率为1.3 W,峰值功率高于250 kW的绿光激光输出,倍频转换效率为48%。倍频绿光中心波长为532.9 nm,脉冲宽度小于541 ps,光束质量因子 $M^2 < 4.8$ 。通过优化种子光注入条件、采用大模场保偏增益光纤,可望获得高光束质量和线偏振的基频放大激光输出;在此基础上,进一步优化倍频晶体长度和聚焦条件,可望实现更高峰值功率的绿光激光输出。

参 考 文 献

- 1 Lin Li. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing [J]. *Laser Material Processing*, 2000, 34(4-6): 231-253.
- 2 Y Hori, I Kuromatsu, Y Sugimura. Photoselective vaporization of the prostate using high power (80 W) KTP laser: one year follow up of the first 101 patients in Japan[J]. *Int J Urol*, 2008, 15(12): 1067-1071.
- 3 W E Glenn. Solid-state light sources for color projection[C]. *Advanced Solid State Lasers (ASSL)*, 1997. 38-45.
- 4 Y Nabekawa, K Kuramoto, T Togashi, *et al.*. Generation of 0.66-TW pulses at 1 kHz by a Ti:sapphire laser[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(17): 1384-1386.
- 5 W Wu, T Ren, J Zhou, *et al.*. Compact all-fiber 102 W picosecond MOPA laser with a narrow spectral linewidth[J]. *Chin Phys Lett* 2011, 28(11): 114206.
- 6 A Liu, M A Norsen, R D Mead. 60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(1): 67-69.
- 7 A V Babushkin, D V Gapontsev, N S Platonov, *et al.*. Pulsed fiber laser with 30 W output power at 532 nm[C]. *SPIE*, 2006, 6102: 61021E.
- 8 S Alam, K Chen, J R Hayes, *et al.*. Over 55 W of frequency doubled light at 530 nm pumped by an all-fiber, diffraction limited, picosecond fibre MOPA [C]. *SPIE*, 2010, 7580: 758007.
- 9 H Yu, J Zhou, X Wushouer, *et al.*. 40 W picosecond fiber amplifier with the large mode-area polarized crystal fiber[J]. *Laser Phys Lett*, 2009, 6(9): 653-656.
- 10 A V Smith. How to select nonlinear crystals and model their performance using SNLO software [C]. *SPIE*, 2003, 4972: 50-57.

11 Qian Shixiong, Wang Gongming. Nonlinear Optics: Principium and Recent Developments [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001. 53-73.
钱世雄, 王恭明. 非线性光学-原理与进展[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2001. 53-73.

12 V G Dmitriev, G G Gurzadyan, D N Nikogosyan. Handbook of Nonlinear Optical Crystals [M]. Wang Jiyang transl. Beijing: Higher Education Press, 2009. 36-44, 62-71.
V G Dmitriev, G G Gurzadyan, D N Nikogosyan. 非线性光学晶体手册[M]. 王继扬译. 北京: 高等教育出版社, 2009. 36-44,

62-71.

13 Lou Qihong. High-Power Fiber Laser and Its Applications [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010. 130-143.
楼祺洪. 高功率光纤激光器及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010. 130-143.

14 G D Van Wiggeren, R Roy. Transmission of linearly polarized light through a single-mode fiber with random fluctuations of birefringence [J]. Appl Opt, 1999, 38(18): 3888-3892.

栏目编辑: 宋梅梅

66 fs 碳纳米管锁模光纤激光器

百飞秒超短脉冲激光器在生物医学成像、材料微加工等特殊领域有着独特应用。碳纳米管具有非线性可饱和吸收特性,可应用于被动锁模激光器。与传统的半导体可饱和吸收镜(SESAM)相比,碳纳米管可饱和吸收体具有恢复时间短、光谱带宽宽和成本低等优点,已成为研究热点之一。本课题组以单臂碳纳米管为被动锁模材料成功实现了掺铒光纤激光器 66 fs 脉冲输出,据已有报道这是到目前为止利用碳纳米管可饱和吸收体获得的最短脉冲。

本文报道的碳纳米管锁模掺铒光纤激光器采用环形腔结构。实验中,利用氟化氢(质量分数为 20%)将一段单模光纤的包层腐蚀掉 40 μm ,然后将

碳纳米管薄膜包裹在光纤侧面,从而制备出碳纳米管可饱和吸收微光纤。利用碳纳米管与倏逝场的作用实现激光器稳定锁模运转。激光谐振腔主要由 40 cm 长高掺杂掺铒增益光纤、耦合器、隔离器、偏振控制器和单臂碳纳米管可饱和吸收微光纤组成,总腔长约为 1.2 m。当抽运功率为 192 mw 时,获得了稳定的重复频率为 146 MHz 的脉冲激光输出。激光中心波长为 1550 nm, 3 dB 带宽为 53 nm。通过自相关仪测得锁模脉冲宽度为 66 fs。利用频谱分析仪测得信噪比为 58 dB(如图 1 所示)。激光器的最大输出功率为 26 mW。

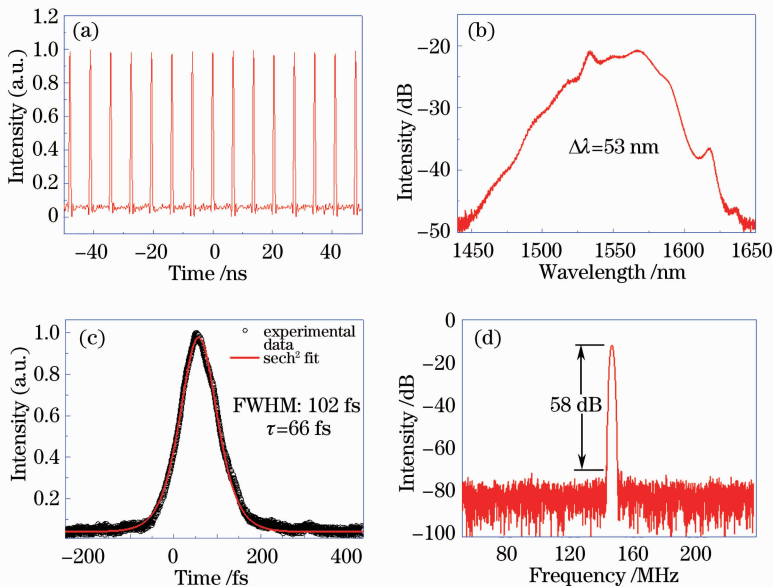


图 1 (a) 锁模脉冲序列; (b) 输出光谱; (c) 脉冲宽度; (d) 无线电频谱

Fig. 1 (a) Mode-locked pulse train; (b) output spectra; (c) pulse width; (d) radio frequency spectra

于振华¹ 王勇刚² 董信征¹ 李彦林¹ 田金荣¹ 宋晏蓉^{1,*}

¹ 北京工业大学应用数理学院, 微纳信息光子技术研究所, 北京 100124

² 中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

* E-mail: yrsong@bjut.edu.cn

收稿日期: 2013-06-04; 收到修改稿日期: 2013-06-21