

文章编号 2095-1531(2015)05-0800-06

脉冲单频 Nd:YVO₄ 激光器及其倍频输出特性研究

董磊^{1*}, 刘欣悦¹, 陈浩²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春新产业光电技术有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 为了研制激光干涉成像所需的主振荡功率放大(MOPA)结构脉冲单频激光器, 本文完成 MOPA 激光器的种子源即声光调 Q 脉冲单频 1 064 nm 激光器的特性研究, 同时完成种子源腔外倍频绿光特性研究。脉冲单频激光器采用声光调 Q 模块实现脉宽约 20 ns 的 1 064 nm 脉冲激光输出, 采用环形腔设计并采用一组不同厚度的标准具实现单纵模运转。实验研究基频 1 064 nm 和倍频 532 nm 激光脉冲的线宽, 得出在全脉宽范围内都具有较高时间相干性的结论。实验分别获得脉宽约 28 ns 峰值功率约 6.5 kW 的 1 064 nm 脉冲单频激光和脉宽约 20 ns、峰值功率约 0.5 kW 的 532 nm 脉冲单频激光, 腔外倍频效率为 5.6%。实验同时也验证了腔外倍频的激光脉宽压缩效应。

关键词: 单频激光器; 声光调 Q; 脉冲激光; 腔外倍频; 相干性

中图分类号: TH743 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20150805.0800

Properties of pulse single-frequency laser and extra-cavity double frequency green laser

DONG Lei^{1*}, LIU Xin-yue¹, CHEN Hao²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine machines and physics,

Chinese Academy of Sciences, Chanchun 130033, China;

2. Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co., Ltd., Chanchun 130000, China)

* Corresponding author, E-mail: nodepression@126.com

Abstract: In order to manufacture a pulse single-frequency laser with master oscillator power amplifier (MOPA) structure used for laser coherence imaging, the properties of acousto-optic Q-switched pulse single-frequency 1 064 nm laser used as MOPA laser seed, and properties of extra-cavity double frequency green laser were studied in the paper. 1 064 nm pulse laser output with more than 20 ns pulse width was realized by means of acousto-optics Q-switch, and single-frequency running was realized by means of loop cavity and etalons with different thickness. The linewidth of 1 064 nm and 532 nm pulse lasers were studied. The experiment results show that there is almost complete coherence in all of the pulse width; 1 064 nm pulse single-frequency laser

收稿日期: 2015-07-09; 修订日期: 2015-09-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(No. 2014AAXXX1003X)

with 28 nm pulse width and 6.5 kW peak power and 532 nm laser with 20 ns pulse width and 0.5 kW peak power are obtained respectively. The efficiency of extra-cavity double-frequency is about 5.6%. The effect of laser pulse reduction by extra-cavity double-frequency is also validated by experiments.

Key words: single-frequency laser; acousto-optic *Q*-switch; pulse laser; extra-cavity double-frequency; coherence

1 引言

激光干涉成像具有主动照明提高成像信噪比和不需要获得光强的空间分布而只需测量随时间变化回波能量就可重构图像等优点,成为非常规成像领域的重要组成部分。其中的一种新型成像技术——傅里叶望远镜成像,具有主动成像、合成孔径、克服低阶大气湍流影响和低光学质量能量接收的特点,从而成为近几年的研究热点^[1-6]。

傅里叶望远镜成像关键技术之一是产生光学外差干涉模式。已有产生该干涉模式的方法^[7-8]都是采用连续单频激光器生成的激光先分束再移频最终形成干涉条纹。连续单频激光器在近距离成像(1 km 以内)是可行的,却不适用于远距离成像(几十 km 以上),原因在于成像需要的激光峰值功率与距离的4次方成正比^[9]。所以我们需要研究基于主振荡功率放大(MOPA)结构的脉冲单频激光器的特性,从而研制出可用于远距离成像的脉冲单频激光器。而研究 MOPA 结构脉冲单频激光器的首要问题是要研究脉冲单频种子源的特性,这正是本文研究的出发点。由于没有找到成熟的可定量测量脉冲激光线宽(时间相干性)的仪器或技术,故本文采用迈克耳逊干涉法测量不同光程差下干涉条纹对比度的下降趋势,从而得到脉冲单频激光器的线宽(时间相干性)的测量结果。

本文首先介绍脉冲单频激光器的设计方案;然后给出开展时间相干性(线宽)测量及激光基本参数测量所需的实验装置;随后给出脉冲单频激光时间相干性的变化趋势和激光基本参数测量实验结果。

2 激光器设计方案

最终脉冲 MOPA 激光器的初步设计指标为:

波长 532 nm,峰值功率约 1 GW,脉宽约 10 ns,相干长度 >1 m,重复率约 10 Hz。根据单级功放倍率约 3 倍,12 级功放,最终外腔倍频效率约 50%,可计算得到种子激光器的初步指标要求:波长 1 064 nm,峰值功率 >3.76 kW,脉宽 >10 ns,相干长度 >1 m,重复率约为 10 Hz。

激光器采用环形腔设计,在腔内插入法拉第旋转器、 $\lambda/2$ 波片和标准具,实现窄线宽、单纵模激光输出。该激光器采用以下技术保证高性能的脉冲单频激光的产生。

横模选择技术:种子激光器采用 808 nm LD 泵浦工作物质,减少工作物质中的废热产生,提高光束质量;采用端面泵浦方式,使泵浦光光斑直径略小于谐振腔基膜光斑直径,达到最佳模式匹配,实现单横模运转。

纵模选择技术:种子激光器采用环形腔技术消除空间烧孔效应,同时腔内插入标准具,两者共同作用实现单纵模运转。

线宽压窄技术:在谐振腔中插入多个厚度不同的标准具压窄线宽,保证激光器输出窄线宽(大相干长度)激光。

主动调 *Q* 技术:采用声光调 *Q* 产生重复率稳定、脉宽约 20 ns 的脉冲激光。

倍频技术:采用 KTP 腔外倍频,获得窄线宽脉冲单频激光。

激光器结构示意图和实物图分别如图 1 和图 2 所示。激光器的工作原理如下:连续 LD(半导体泵浦激光器)通过光纤耦合及耦合镜头将能量运送到激光工作物质(Nd:YVO₄,福晶公司生产,尺寸为 3 mm × 3 mm × 7 mm),采用端面泵浦提高光束质量,确保单横模输出;声光调 *Q* 器(AO-switch,中电 26 集团所生产)用来产生重复率为 10 Hz,脉宽(半幅值全宽度)约 20 ns(倍频后脉宽)的脉冲激光;一组不同厚度的标准具(长

春乾昊公司生产)用来压缩线宽,其中薄标准具实现粗选频,随着厚度增加选频精度提高,最终实现单纵模输出;KTP 晶体(福晶公司生产,6 mm × 6 mm × 8 mm)放在腔外,将脉冲单频 1 064 nm 激光转换成脉冲单频 532 nm 激光。实验中主要的热源均采用温控技术保证激光器的持续稳定工作,其中 LD 采用 TEC 半导体制冷和风冷,Nd:YVO₄采用 TEC 半导体制冷加水循环制冷,保证高光束质量的脉冲单频激光的稳定输出。

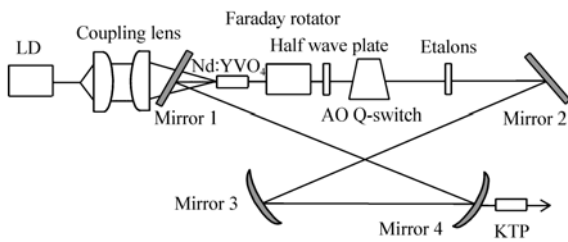


图 1 激光器结构示意图

Fig. 1 Scheme of laser structure

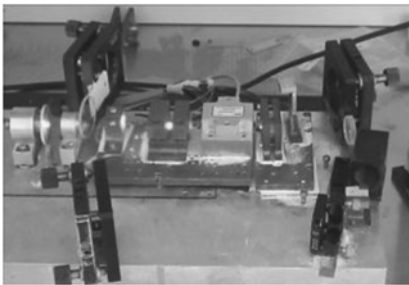


图 2 激光器装置图

Fig. 2 Picture of laser device

3 参数测量实验装置

3.1 时间相干性测量

利用迈克耳逊干涉法和收发同步测量法开展激光时间相干性测量。迈克耳逊干涉法是传统的用来测量光波时间相干性的方法,通过改变两臂光程差使得 CCD 相机靶面的干涉条纹(通过微调一面反射镜的倾角,使得靶面条纹分布易于观测)对比度逐渐降低,从而获得激光的时间相干性信息,如图 3 所示。其中保偏分光棱镜保证分

束后的两束激光的偏振态完全相同,可以消除偏振态不一致引起的条纹对比度下降,从而保证条纹对比度的下降仅由两臂光程差的增加接近或超过波列时间相干长度所致。

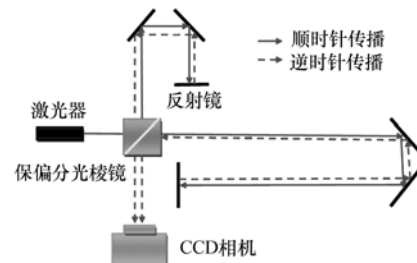


图 3 迈氏干涉仪原理图

Fig. 3 Scheme of Michelson interferometer

收发同步测量法是利用双通道信号发生器和带外触发功能的 CCD 相机,获取脉冲激光产生的瞬时干涉条纹的图像。信号发生器的一路信号触发 AO 调 Q,产生 10 Hz 的脉冲激光输出;另一路触发 CCD 相机实现图像获取。调整 CCD 相机的触发延迟和曝光时间,从而准确稳定捕获瞬时干涉条纹图像。迈克耳逊干涉法和收发同步测量法相结合的测量实验装置实物图如图 4 所示。

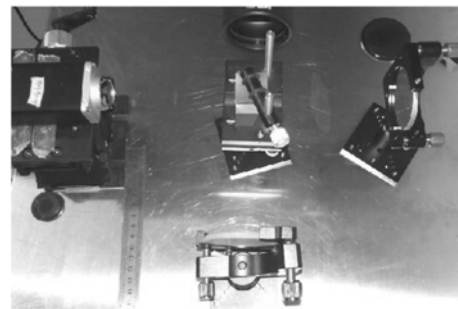


图 4 时间相干性测量装置图

Fig. 4 Picture of the measurement device of temporal coherence

3.2 单频性测量

由于倍频过程不会改变激光单频性(即不改变激光纵模数),所以基频光 1 064 nm 的单频性是通过倍频后绿光的单频性来验证的。单频性利用间隔为 9.8 mm 的标准具检测,当 CCD 显示为清晰的单套环时,表示激光为单纵模。测量实物

图和结果分别为图5和图6所示。

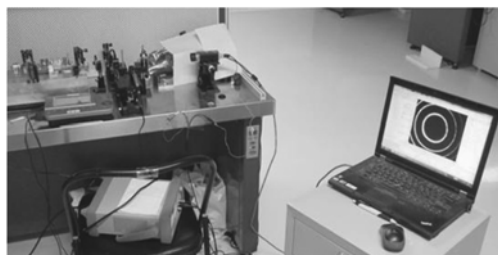


图5 单频性测量

Fig. 5 Measurement of single-frequency



图6 单套干涉环

Fig. 6 Single group of coherent rings

3.3 激光基本参数测量设备

利用 Coherent 公司的激光能量计 (LabMax-Top) 测量单脉冲能量和重复率。利用 Thorlabs 公司的高速探头 (DET10A) 和 Tek 示波器

(TDS1002C-EDU) 测量激光脉宽。

4 激光特性测量实验结果

4.1 时间相干性测量

利用迈氏干涉法测量脉冲单频激光器的时间相干性,测量光程差分别为 0、1、2、3、4、5 和 6 m 时的干涉条纹,如图 7 所示,并计算其对比度。对比度的算法如下:在光束覆盖范围内选择 5 个具有代表性的局部单周期条纹,分别计算各自的对比度,然后将对比度平均值作为该光程差下的对比度。光程差分别为 0、1、2、3、4、5 和 6 m 时干涉条纹的对比度分别为:0.977(0 m),0.852(1 m),0.839(2 m),0.819(3 m),0.762(4 m),0.697(5 m),0.642(6 m)。可以看出干涉条纹的对比度随着光程差的增加大致呈现出递减的趋势。

根据文献[10]中相干时间的定义,当对比度下降为 0.707 时,对应的迈氏干涉法的两臂的光程差为相干长度。由于 5 m 光程差对应的脉冲单频激光器的干涉条纹的对比度为 0.697,该值与 0.707 很接近,可认为激光的相干长度近似为 5 m,满足对种子源激光器的要求。利用公式 $\Delta\nu = c/L_c$ [11],其中 c 为光速, L_c 为相干长度,计算得到激光的线宽约为 60 MHz。

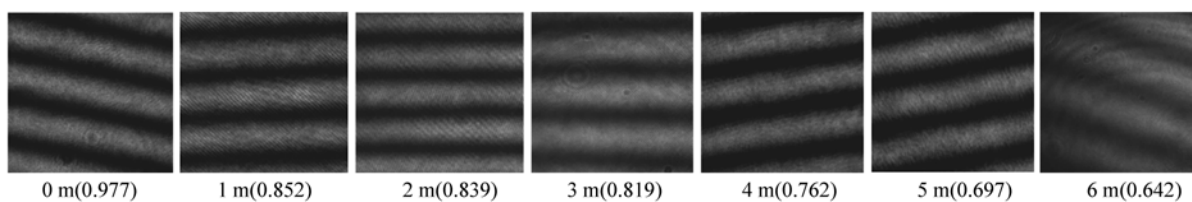


图7 在不同光程差下的干涉条纹

Fig. 7 Coherent fringes for different optical path difference

4.2 激光基本参数测量

在单纵模条件下,测量 1 064 nm 和 532 nm 的单脉冲能量及脉宽,如表 1 所示。根据倍频后 532 nm 单脉冲能量与 1 064 nm 单脉冲能量的比值,计算出腔外倍频的转化效率约为 5.6%,如表 1 所示。根据公式 $P_{\text{summit}} = E_{\text{pulse}}/W$ 计算峰值功率

P_{summit} ,其中 E_{pulse} 为单脉冲能量, W 为脉宽(半幅值全宽度)。1 064 和 532 nm 脉冲激光的峰值功率分别如表 1 所示。由表可以看出,已研制的种子源的基本参数也满足本文第 2 部分对种子源激光器的指标要求。根据表 1 的数据计算得到倍频引起的脉宽压缩比为 28.7%。

表1 1 064 nm 和 532 nm 激光的单脉冲能量、脉宽及峰值功率

Tab.1 Pulse energy, pulse width and peak power of 1 064 nm and 532 nm laser

测量次数	1 064 nm 单脉冲能量/ μJ	1 064 nm 脉宽/ns	1 064 nm 峰值功率/kW	532 nm 单脉冲能量/ μJ	532 nm 脉宽/ns	532 nm 峰值功率/kW
1	185	28.6	6.5	10	20.4	0.49
2	189	28.8	6.6	11	20.2	0.54
3	184	27.6	6.7	10	19.9	0.50
4	190	27.8	6.8	9	20.0	0.45
5	185	28.2	6.6	9	20.6	0.44
6	177	28.5	6.2	10	20.1	0.50
7	177	28.3	6.3	12	19.8	0.61
8	183	28.1	6.5	11	19.9	0.55
平均值	184	28.2	6.5	10.3	20.1	0.51
脉宽压缩/%	28.7					
倍频效率/%	5.6					

5 结 论

本文对声光调 Q 脉冲单频激光器特性及其腔外倍频特性开展实验研究。研究表明采用环形腔和多个标准具压缩激光线宽后,可以获得单纵模脉冲输出。脉冲单频激光及其倍频后绿光具有几乎全脉宽范围内的相干性。激光线宽(相干长

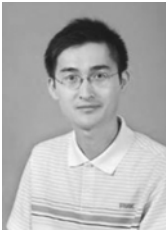
度)主要受标准具数目、厚度和倾角的限制,而脉宽主要受腔长和腔镜的限制,可以相对独立地调整激光线宽和脉宽。倍频会部分压缩脉宽,实验表明当基频光脉冲约为 28 ns 时,获得约 20 ns 的绿光,腔外倍频的压缩比约为 28.7%。当基频光的峰值功率达到 6.5 kW 时,可获得约 0.5 kW 的绿光,腔外倍频效率约为 5.6%。

参考文献:

- [1] 张炎,杨春平,郭晶,等. 实验室中傅里叶望远镜频谱抽取方式[J]. 强激光与粒子束,2011,23(3):571-576.
ZHANG Y, YANG CH P, GUO J, *et al.*. Spectrum extraction mode for Fourier telescope in laboratory[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 571-576. (in Chinese)
- [2] 陈卫,黎全,王雁桂. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究[J]. 光学学报,2011,31(2):0311001-1-6.
CHEN W, LI Q, WANG Y G. Experimental research of fourier telescope imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0311001-1-6. (in Chinese)
- [3] 刘欣悦,董磊,王建立. 稀疏采样傅里叶望远镜成像[J]. 光学精密工程,2010,18(3):521-527.
LIU X Y, DONG L, WANG J L. Fourier telescope imaging via sparse sampling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 521-527. (in Chinese)
- [4] 于前洋,曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(上)[J]. 中国光学与应用光学,2008,1(1):1-12.
YU Q Y, QU H S. Realization of high resolution visible earth observation on geostationary earth orbit[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 1-12. (in Chinese)
- [5] 陈宝刚,董磊,林旭东. 傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜[J]. 光子学报,2011,40(1):87-91.
CHEN B G, DONG L, LIN X D. Segmented mirror of Fourier telescope field experimental system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 87-91. (in Chinese)
- [6] 董磊,刘欣悦,陈宝刚,等. 傅里叶望远镜外场实验与结果分析[J]. 光子学报,2011,40(9):1317-1321.
DONG L, LIU X Y, CHEN B G, *et al.*. Field experiment and result analysis of Fourier telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*

- ca,2011,40(9):1317-1321. (in Chinese)
- [7] CUELLAR E L, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system[J]. *SPIE*,2005,5896:58960D1-15.
- [8] 董磊,刘欣悦,王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现[J]. *光学精密工程*,2008,16(6):999-1002.
DONG L, LIU X Y, WANG J L. The realization of Fourier telescope technology in laboratory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):999-1002. (in Chinese)
- [9] 庞春颖,张涛. 激光主动成像系统信噪比模型的研究[J]. *光学精密工程*,2008,16(2):319-324.
PANG CH Y, ZHANG T. Signal to noise ratio model of laser active imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):319-324. (in Chinese)
- [10] 闵春宗. 迈克尔逊干涉仪的时间相干性[J]. *松辽学刊*,1985,1:31-33.
MIN CH Z. The temporal coherence of Michelson interferometer[J]. *Songliao J.*,1985,1:31-33. (in Chinese)
- [11] 季家榕. 高等光学教程:光学的基本电磁理论[M]. 北京:科学出版社,2007.
JI J R. *Higher Optical Tutorial: Basic Electromagnetic Theory of Optics*[M]. Beijing: Science Press,2007. (in Chinese)

作者简介:



董磊(1982—),男,山东济宁人,硕士,助理研究员,主要从事傅里叶光学和激光技术等方面的研究。E-mail:nodepression@126.com



陈浩(1986—),男,河北献县人,硕士,助理工程师,主要从事全固态激光器与非线性频率变换技术方面的研究。E-mail:ayq532@163.com



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,研究员,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail:sirliuxy@sina.com