

基于 RTP 相位调制器的 900 Hz 单频 脉冲 Nd:YAG 激光器

张俊旋^{1,2} 朱小磊¹ 臧华国¹ 陈卫标¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 报道了半导体激光器双端面抽运单频调 Q Nd:YAG 激光器。采用磷酸钛氧铷(RTP)电光晶体作为腔内相位调制器主动调谐腔长,实现单频种子注入,获得稳定的单纵模输出。采用另外一对 RTP 电光晶体作为调 Q 开关,在 900 Hz 重复频率下,利用单振荡级获得单脉冲能量为 7.5 mJ,脉宽为 14.6 ns,线宽为 45 MHz 的 1064 nm 激光脉冲序列输出。激光束在水平方向和垂直方向的光束质量 M^2 值分别为 1.30 和 1.36。输出激光 2 min 的频率稳定性为 1.1 MHz,线宽稳定性为 0.52 MHz。在传导冷却结构中,实现了高频率稳定性和线宽稳定性的窄线宽单频脉冲激光的输出。

关键词 激光器;种子注入;电光调 Q;全固态激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0601004

900 Hz Single-Frequency Pulsed Nd:YAG Laser Based on RTP Phase Modulator

Zhang Junxuan^{1,2} Zhu Xiaolei¹ Zang Huaguo¹ Chen Weibiao¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A laser diode dual-end-pumped, single-frequency Q-switched Nd:YAG laser is implemented. Single-frequency seed injection is realized by utilizing an RbTiOPO₄ (RTP) crystal as the intracavity phase modulator to modulate the length of the cavity, which leads to the single longitudinal mode output. Adopting another pair of RTP crystals as a Q-switcher, the laser is capable of generating 7.5 mJ pulse-energy with 14.6 ns pulse duration, and 45 MHz linewidth at 900 Hz repetition rate. The beam qualities M^2 of 1.30 in the horizontal direction and 1.36 in the vertical direction are obtained. The frequency stability is 1.1 MHz and the linewidth stability is 0.52 MHz over 2 min laser output. In conductively cooled structure, the output of single-frequency pulsed laser with narrow linewidth, high frequency stability and high linewidth stability is obtained.

Key words lasers; seed injection; electro-optic Q-switching; solid-state laser

OCIS codes 140.3460; 140.3570; 140.3540; 140.3580

1 引言

精确的大气风场分布对于气象动力学研究、数值天气预报改进、环境监测、航空航天保障、机场和靶场风

收稿日期: 2015-01-20; **收到修改稿日期:** 2016-02-29

作者简介: 张俊旋(1988—),女,博士研究生,主要从事单频脉冲全固态激光器技术方面的研究。

E-mail: zhangjunxuan58@hotmail.com

导师简介: 朱小磊(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事固体激光器技术及激光器应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn(通信联系人)

速测量等都有着重要意义。目前,直接探测多普勒测风激光雷达是探测晴空风场精细结构的重要手段之一。单频脉冲激光器作为激光雷达的发射源,其线宽、频率稳定性、单脉冲能量、重复频率、光束质量等参数直接决定了多普勒测风激光雷达的测量精度和探测能力^[1-3]。因此,具有傅里叶转换极限的窄线宽高性能脉冲激光器的研制对提升多普勒测风激光雷达的测风精度、时空分辨率、稳定性等整体水平有着重大意义。

2007年,Schröder等^[4]报道了欧洲太空局用于测风的大气多普勒激光雷达(ALADIN)的空载原型机上的单纵模激光器。采用建立时间最小化的种子注入技术,实现脉冲宽度为25 ns,脉冲能量为60 mJ,重复频率为50 Hz的激光输出,14 s的频率稳定性的均方差值为1.3 MHz。2008年,Hovis等^[5]报道了一台种子注入单频355 nm激光器,输出脉冲能为30 mJ,脉冲宽度为15 ns,重复频率为200 Hz,光束质量因子为3,30 s的频率稳定性的均方差值为5 MHz。该激光器属于美国航天航空局的对流层风激光雷达技术实验(TWiLiTE)项目,研制的目的是应用于多普勒测风雷达。

对于直接探测多普勒测风雷达,通过增大激光发射功率、延长积分时间可以提高系统的信噪比,降低风速测量误差。激光雷达的扫描模式要求激光输出较高的重复频率。然而,在激光平均功率、积分时间相同时,较低的重复频率可以提高系统的信噪比^[6]。因此,根据激光雷达的测量要求及信噪比要求,本文选择激光重复频率为900 Hz进行研究。通常,种子注入的谐振腔长控制方案是通过控制压电陶瓷来实现的。然而,压电陶瓷存在非线性效应,会使腔长反馈精度降低,进而降低输出激光的频率稳定性;此外,压电陶瓷在高重频下工作,自身使用寿命及运动腔镜的指向可靠性将降低,从而造成种子注入激光器的性能参数退化。压电陶瓷的上述缺点影响了其在谐振腔中的应用。采用电光晶体的电光特性来调谐从动腔腔长,可以克服压电陶瓷的缺点,提高单频激光器的频率稳定性及可靠性。本文在半导体激光双端抽运的电光调Q Nd:YAG激光器中,采用腔内内置磷酸钛氧铷(RTP)电光晶体实现腔长调谐,在900 Hz重复频率下,成功实现稳定的种子注入,获得了高频率稳定性的单纵模脉冲激光输出。

2 实验装置

激光器的光学示意图如图1所示。激光器主要由3部分组成:从动腔、种子注入光路、电路控制系统。图中LD为半导体激光器,QWP为四分之一波片,HWP为半波片。SLM laser为Innolight公司生产的的Mephisto OEM200激光器。

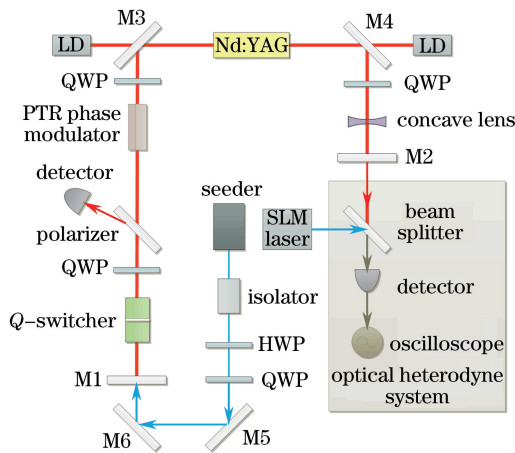


图1 单频 Nd:YAG 激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the single-frequency Nd:YAG laser

2.1 谐振腔设计

为了使激光器结构紧凑,将谐振腔的后腔镜 M1、输出镜 M2、45°双色镜 M3 和 M4 组成 U 型折叠腔排布。M1 对1064 nm激光的透射率为5%,M2 对1064 nm激光的透射率为60%。M3 和 M4 均为对1064 nm激光高反、对808 nm抽运激光高透的分束镜。根据 ABCD 变换矩阵,计算得到从动腔稳定性与腔长的关系曲线如图2所示。实验中,选择腔长为460 mm,此时对应的(A+D)/2 接近0.5,满足谐振腔稳定性条件。

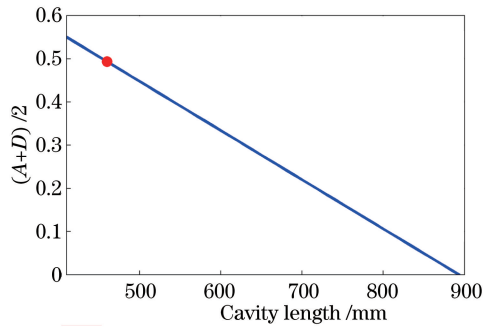


图 2 腔稳定性和腔长的关系

Fig. 2 Relationship between cavity stability and cavity length

激光增益介质采用 YAG/Nd:YAG/YAG 键合结构晶体棒,其中钕离子掺杂浓度为 0.3%(离子数分数)。晶体直径为 4 mm,掺杂部分长度为 30 mm,两端非掺杂部分长度各为 5 mm。采用这种复合晶体结构可以有效减轻端面效应,进而减小热焦距。将晶体安装在半导体制冷片(TEC)制冷的紫铜热沉中,通过温控系统将温度控制在 22 °C,温控精度为 0.1 °C。增益介质两端的两个四分之一波片用来消除腔内的空间烧孔效应^[7]。

谐振腔中的键合 Nd:YAG 可以等效为一个焦距随抽运功率动态变化的热透镜。热焦距随抽运功率的变化曲线如图 3 所示。实验中最大抽运功率约为 40 W,对应的热焦距大于 300 mm。腔内插入焦距 $f = -800$ mm 的负透镜,用来补偿高重复频率、高抽运功率下增益介质产生的热透镜效应。增益介质处振荡模光斑随热透镜焦距的变化曲线如图 4 所示。显然,当热透镜焦距大于 300 mm 后,谐振腔振荡模光斑直径的变化平缓,有利于能量的稳定输出。确保激光器远离非稳定工作区域。

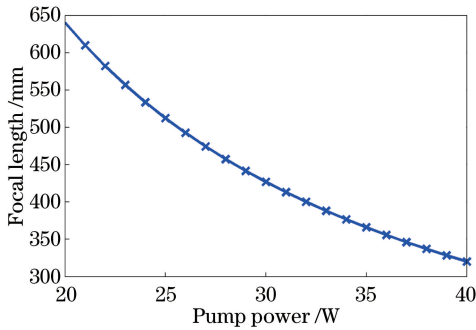


图 3 热透镜焦距随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Focal length of thermal lens changes with pump power

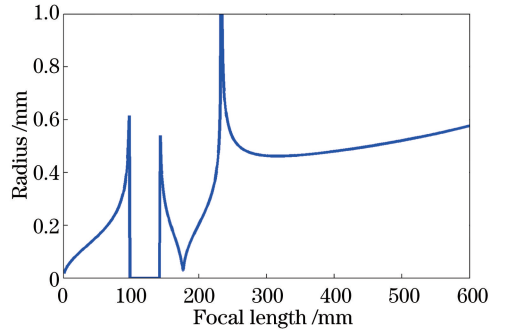


图 4 振荡模光斑半径随热透镜焦距的变化曲线

Fig. 4 Radius of oscillation mode's spot changes with focal length of the thermal lens

为了确保激光器基横模输出,增益介质中的抽运光和振荡激光要有良好的模式匹配。在低功率下,增益介质中抽运光的光斑半径应不大于振荡激光的基模半径。随着抽运功率的增加,过大的基模半径会因热致衍射损耗急剧增加而导致激光效率降低。因此,在高功率下,增益介质内抽运光光斑半径与振荡激光基模半径比值应略大于 1,且随着抽运功率的增加,比值应呈增大的趋势,同时也要保证基模相对于其他高阶模有竞争优势。实验中,抽运源是两个高功率半导体激光器,峰值功率均为 150 W,输出波长为 808 nm。抽运光经过尾纤输出,通过耦合系统准直聚焦后,从端面进入增益介质,在增益位置处的光斑半径大小约为 700 μm ,而增益介质处的基模大小约为 550 μm ,增益介质中的抽运光和振荡激光获得良好的模式匹配,保证基横模输出。

2.2 种子注入

采用谐振探测种子注入方法实现单纵模输出^[8]。单频种子源是课题组研制的 Nd:YAG 非平面环形腔(NPRO)激光器,激光束在水平方向和垂直方向的光束质量 M^2 值分别为 1.12 和 1.07^[9]。隔离器是为了防止从动腔激光损坏种子源,其隔离度为 60 dB。半波片和四分之一波片用来调节种子光的偏振状态,使其满足谐振探测的要求。对 1064 nm 激光高反镜 M5 和 M6 将种子光路调入从动腔。从动腔中有两组 RTP 电

光晶体。一组 RTP 电光晶体(Q-switcher)结合四分之一波片和起偏器组成调 Q 开关。另一组 RTP 电光晶体作为相位调制器来调谐腔长。通过调整从动腔中电光晶体的方向,使得外加电场不改变激光的偏振状态,仅仅改变其相位。在每个抽运周期,电光晶体驱动电源给 RTP 晶体施加一线性斜坡电压,电光晶体的折射率随之发生线性变化,进而改变光学腔长。光电二极管探测器检测到种子光经过从动腔形成的干涉信号的峰值后,即种子光的频率和从动腔腔长谐振时,打开调 Q 开关,随即输出单纵模脉冲激光^[10]。同时由时序控制系统在每个激光脉冲输出后,对斜坡电压起始时刻相对于抽运脉冲起始时刻的延时量进行反馈控制,使每次调 Q 开关在抽运脉冲后沿的相同位置打开,以此来提高激光脉冲的能量稳定性。

3 实验结果及讨论

900 Hz 激光输出能量、脉冲宽度随抽运能量的变化曲线如图 5 所示。当输入 44.8 mJ 的抽运能量时,获得最大输出能量 7.5 mJ,对应的光-光转换效率为 17%,斜效率为 20%。输出脉冲宽度随抽运能量的增加而减小。在最大输出能量下,使用 500 MHz 带宽的 PIN 光电二极管接收输出脉冲的散射光,连接到 500 MHz 带宽的 Tektronix TDS3054 示波器来显示波形,如图 6 所示。从图 6 可以看出,脉冲输出波形光滑,脉冲宽度约为 14.6 ns。激光器的两个纵模间隔约为 326 MHz,如果有多于一个的纵模产生,则输出脉冲波形会出现调制尖峰。在激光器连续运转中监测示波器,发现波形光滑且重复度很好,单纵模输出稳定。

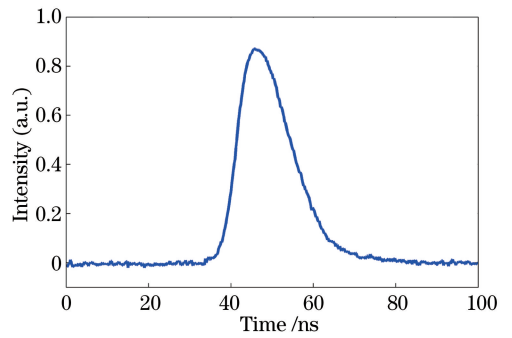
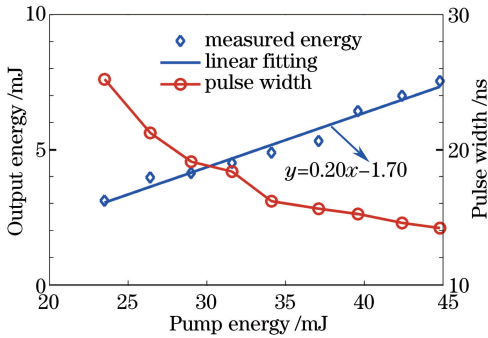


图 5 输出能量、脉冲宽度与抽运能量之间的关系

图 6 输出脉冲波形

Fig. 5 Output energy and pulse width as a function of pump energy

Fig. 6 Output pulse waveform

用 Spiricon M2-200s 光束质量分析仪测量激光光束的质量 M^2 因子,结果如图 7 所示,水平方向和竖直方向的测量值分别为 1.30 和 1.36。采用 Spiricon LBA-300PC 型 CCD 观察输出激光,得到激光光斑强度分布图(图 7 插图)。可以看到,所设计的双端抽运 Nd:YAG 激光器较好地实现了增益介质的热效应补偿,获得了近衍射极限的激光光束质量输出。

实验中采用光学外差法测量种子注入激光器的频率稳定性和线宽^[4]。选用 Innolight 公司生产的 Mephisto OEM200 激光器作为频率参考源,它是单向运转的非平面环形腔 Nd:YAG 连续激光器,输出功率为 200 mW,线宽小于 1 kHz,有很高的频率稳定性。利用 Mephisto OEM200 激光器的内部温度调谐,改变其输出频率,使其和输出脉冲的频率有一定差值。将它与输出激光做拍频,最终得到脉冲激光的绝对频率稳定性。频率稳定性测试系统装置如图 1 所示,半透半反镜将输出脉冲激光和连续种子源调成共线。500 MHz 带宽的 PIN 光电二极管将接收到的光信号转化成电信号,并用带宽为 600 MHz 的 LeCroy WaveRunner62Xi 示波器记录拍频信号。用 Matlab 软件编写程序,给每组数据加汉宁窗进行快速傅里叶变换,提取 360 MHz 附近的频率信息,做高斯拟合,得到其半峰全宽为 45 MHz(线宽),如图 8 所示。

图 9 给出了 37 min 内的线宽稳定性,线宽平均值(L_{mean})为 45.9 MHz,均方差(σ_{RMS})为 1.0 MHz。图 9 内嵌图为稳定性最优的 2 min 线宽图,该时间段内线宽平均值为 45.0 MHz,均方差为 0.52 MHz。图 10 给出了同一组信号 37 min 内的频率稳定性,频率平均值(F_{mean})为 361 MHz,均方差为 5.8 MHz。图 10 内嵌图为稳定性最优的 2 min 频率图,该时间段内频率平均值为 368 MHz,均方差为 1.1 MHz。在相近的实验条件下,采用压电陶瓷调谐腔长得到的频率稳定性的均方差值为 3.5 MHz^[11]。可见,相比于压电陶瓷调谐腔

长,采用电光晶体调谐腔长可以得到更高的频率稳定性。