

Tm, Ho:YAP 种子注入激光多普勒测速实验

鞠有伦, 戴通宇, 申英杰, 王 强, 姚宝权, 王月珠

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 报道了一台二极管泵浦种子注入 Tm, Ho:YAP 激光器。在重复频率 100 Hz 时, 获得了单脉冲能量 2.8 mJ、脉冲宽度 289 ns 的 2.13 μm 单频脉冲激光输出。利用该种子注入 Tm, Ho:YAP 激光器作为发射光源, 以一个最大标称线速度 20.4 m/s、直径 10 cm 的风扇作为模拟探测目标, 通过外差式相干探测的方法进行了激光多普勒测速实验。利用本振光与信号光的激光拍频信号, 得到包含模拟探测目标速度信息的多普勒频移, 通过数据处理计算出了风扇不同转速条件下模拟探测目标的速度, 并与模拟目标的实际速度进行了比对, 测量速度误差小于 1 m/s。

关键词: 激光多普勒测速; 激光技术; 相干探测; 种子注入

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0344-05

Doppler velocity measurement experiment based on Tm, Ho:YAP injection-seeded laser

Ju Youlun, Dai Tongyu, Shen Yingjie, Wang Qiang, Yao Baoquan, Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A diode-pumped injection-seeded Tm, Ho:YAP laser was reported. The output single-frequency pulse energy of 2.8 mJ at pulse repetition frequency of 100 Hz with a pulse width of 289 ns was obtained. Using the injection-seeded Tm, Ho:YAP as the emission source, a laser Doppler velocity measurement experiment by means of heterodyne coherent detection was demonstrated. The detecting target was an air fan with diameter of 10 cm and the maximum linear velocity of 20.4 m/s. The Doppler frequency shift, carrying the velocity information of the air fan, was achieved from heterodyne signal between the local oscillator and the scattering light from the air fan. Under various velocity conditions, the linear velocity of the air fan was achieved from the experimental data. Compared with the actual speed of the air fan, the measurement error of experiment was less than 1 m/s.

Key words: laser Doppler velocity measurement; laser technology; coherent detection; injection-seeded

0 引言

激光雷达是激光技术与雷达技术结合的产物。与传统微波雷达相比,其具有体积小、质量轻,具有角分辨率高、速度和距离分辨率高、抗干扰能力强等优点^[1]。按照激光雷达回波信号的探测方式划分,激光雷达可分为直接探测和相干探测两种方式。采用相干探测技术的固体激光雷达具有探测准确度高、获取信息量大等优点,被广泛应用于光学遥感测量、大气风场探测等领域,已成为一种远距离风速和运动目标测量的有力工具,并已成为地面和空中测量大气湍流的常规工具^[2-5]。采用相干探测技术的激光雷达要求激光光源既满足单纵模、窄线宽、高频率稳定度的要求,又要有足够高的单脉冲能量和足够宽的脉冲宽度。一台激光器难以满足上述要求,而种子注入技术在激光器中的应用使其变为可能^[6]。种子注入激光器以一台窄线宽、单纵模、高频率稳定度的低功率连续输出激光器为种子光,利用种子注入技术控制一台高功率脉冲激光器,从而获得窄线宽、单纵模的高功率激光输出,同时可以利用种子光作为相干探测的本振光信号与激光雷达探测回波信号进行混频,从而获得回波信号的频移信息。 $2\ \mu\text{m}$ 激光处于人眼安全激光波段,对人眼的损伤阈值是 $0.4\sim 1.4\ \mu\text{m}$ 激光的 2000 倍。与 CO_2 激光($\lambda=10.6\ \mu\text{m}$)相比, $2\ \mu\text{m}$ 波段激光具有优异的大气传输特性,是良好的探测光源。因此,以 $2\ \mu\text{m}$ 固体激光器作为发射机的相干多普勒风速监测激光雷达和差分吸收激光雷达是激光雷达研究的重点之一^[7-10]。

文中采用种子注入技术,以 Tm,Ho:YAP 晶体作为工作介质实现了 $2\ \mu\text{m}$ 单频脉冲激光输出,获得了重复频率 100 Hz、单脉冲能量 2.8 mJ、脉冲宽度 289 ns 的 $2\ \mu\text{m}$ 单频激光,并以此激光器作为激光发射光源。利用一个最大标称线速度为 20.4 m/s、直径 10 cm 的风扇作为模拟探测目标,进行了 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光相干多普勒测速实验,对即将进行的 $2\ \mu\text{m}$ 激光多普勒测风研究进行了前期的理论验证和测试。通过实验得到了在不同风扇转速条件下包含风扇转速信息的激光拍频信号。实验结果表明该激光器可以满足激光多普勒测风雷达的一般要求,为进一步研制 $2\ \mu\text{m}$ 激

光多普勒测风雷达打下了坚实基础。

1 种子注入 Tm,Ho:YAP 激光器

图 1 为种子注入 Tm,Ho:YAP 激光器结构示意图,该激光器由三部分组成:单纵模种子激光器(主激光器)、环形腔激光器(从激光器)、种子注入系统。

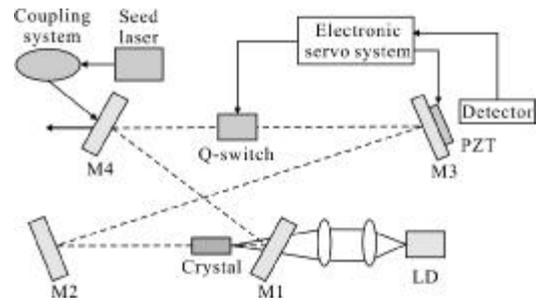


图 1 种子注入 Tm,Ho:YAP 激光器结构示意图

Fig.1 Schematic of the injection-seeded Tm,Ho:YAP laser

1.1 种子激光器

种子激光器采用低温液氮制冷的 Tm,Ho:YAP 微片结构,该结构起到了法布里-珀罗(F-P)选纵模的作用。另外,微片两端镀有腔膜,使其本身构成谐振腔,避免了空气扰动对激光输出频率的影响。采用光纤耦合输出、中心波长 792 nm、最大输出功率为 4 W 的半导体激光器作为种子激光器的泵浦源,耦合光纤芯径为 $100\ \mu\text{m}$ 。Tm,Ho:YAP 晶体为 c 轴切割,尺寸为 $4\times 4\times 1\ \text{mm}^3$,掺杂浓度为 Tm: 5 at%, Ho: 0.3 at%。微片置于杜瓦瓶中,实现液氮制冷。在激光二极管泵浦功率 2.9 W 时,种子激光器可获得 37 mW 的单纵模激光输出,其中心波长为 2130.7 nm。图 2 为使用 F-P 标准具(自由光谱区为 3.75 GHz)测量的种子激光器模式图,从图中可以看出,种子激光器为单纵模运转。

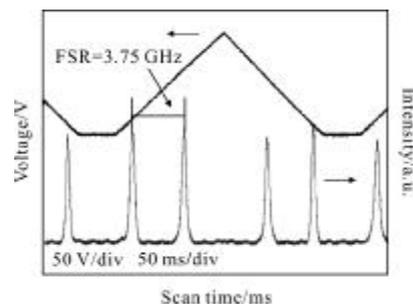


图 2 种子激光器单模输出图

Fig.2 Spectrum of seed laser

1.2 环形腔激光器及注入耦合系统

对于注入锁频系统,从激光器通常采用环形腔结构。相对于驻波腔,行波腔具有输出激光光束质量好、相对强度噪声低、阈值低等优点,而且避免了空间烧孔效应,有利于激光器的单纵模运行。

从激光器采用光纤耦合的半导体激光器作为泵浦源,其中心波长为 792 nm,耦合光纤芯径 400 μm ,最大输出功率为 40 W。一块 $4\times 4\times 8\text{ mm}^3$ 、掺杂浓度为 Tm:5 at%, Ho:0.3 at% 的 Tm,Ho:YAP 晶体作为从激光器的工作物质。Tm,Ho:YAP 晶体同样置于杜瓦瓶中,实现液氮制冷。M1、M2、M3、M4 为谐振腔腔镜,其中 M1、M2、M4 为平镜,M3 为曲面镜,曲率半径 $R=1\ 000\text{ mm}$ 。M1、M2 对泵浦光宽带高透,对 2 μm 激光高反;M3 对泵浦光和 2 μm 激光高反;M4 为输出耦合镜,对 2 μm 激光部分反射。

主激光器输出的单纵模 2 μm 种子激光经过注入耦合系统进入从激光器。种子激光注入到从激光器之后,为实现主激光器与从激光器的纵模匹配,由伺服系统控制的锯齿波发生器驱动固定在曲面镜 M3 上的压电陶瓷(PZT),通过扫描谐振腔长,获取种子光在腔内的谐振信号,通过放置于 PZT 后的 InGaAS 探测器提取谐振信号,经过伺服系统中的放大和比较后,输出触发信号控制 Q 开关,从而实现种子注入。

图 3 为种子注入后激光器输出单脉冲能量和脉冲宽度与泵浦功率之间的关系。种子注入后,在重复频率 100 Hz、泵浦功率 5.2 W 时获得了单脉冲能量 2.8 mJ、脉冲宽度 289 ns 的单频 2 μm 激光输出。利用单色仪对种子注入后激光波长进行了测量,其中中心波长为 2 130 nm,与种子激光中心波长一致。

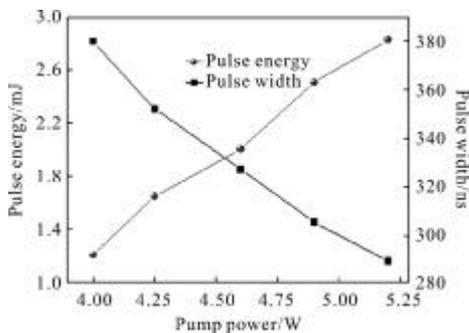


图 3 种子注入后激光器输出单脉冲能量和脉冲宽度与泵浦功率之间的关系

Fig.3 Output energy and pulse width of Tm,Ho:YAP laser in injection-seeded mode versus pump power

图 4 为激光器自由运转和种子注入时激光脉冲波形及其傅里叶变化后的频谱。在自由运转时,时域上有明显的调制信号,通过傅里叶变换,可看出在频域上有 293 MHz 和 586 MHz 的拍频信号,与腔长为 1 m 的环形腔纵模频率间隔一致,说明在激光器自由运转时,激光器为多模输出。在种子注入时,时域谱脉冲信号较光滑,频域上没有拍频信号,证明激光器单频输出。

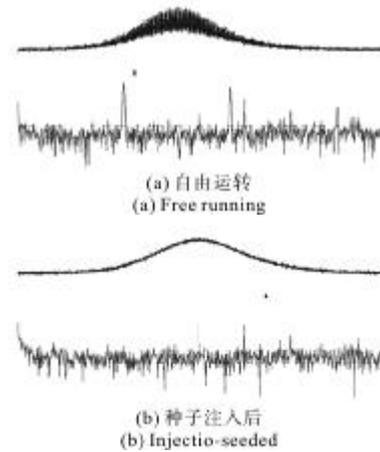


图 4 激光脉冲波形及频谱

Fig.4 Waveforms and spectrum of laser pulse

2 激光多普勒测速实验

利用图 5 所示的装置进行 2 μm 种子注入激光器激光相干多普勒测速实验。利用一个最大标称线速度 20.4 m/s、直径 10 cm 的风扇作为模拟探测目标。风扇转速连续可调,通过风扇转速的变化模拟运动目标速度的变化。为了避免杂散光以及低频带噪声的影响,将种子注入激光器的种子光分出一部分并耦合到单模光纤中,光纤尾端连接到一个中心频率 95 MHz 的声光移频器,利用声光移频器输出的一

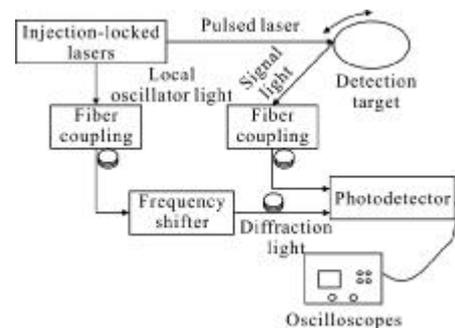


图 5 激光多普勒测速实验装置图

Fig.5 Experimental setup of laser Doppler velocity measurement

级衍射光作为本振光。将照射在风扇边缘的脉冲激光散射的回波信号光与种子光混频,反演出运动目标的瞬时速度信息。

实验中分别对风扇静止、以及风扇以不同速度正向、反向转动情况下风扇的运动信息进行了测量,并对各种情况下本振光与信号光在光电探测器上的混频信号分别进行记录,对每一种情况下的混频信号随机采集 10 组数据,采样时间 1 μs,采样频率 2.5 GHz。最后对采集到的混频信号进行快速傅里叶频谱分析(FFT)。

图 6、图 7 分别为风扇正向转动频率为 33.3 Hz (10.4 m/s)时,本振光与风扇散射回来的信号光的拍频信号示波器轨迹以及傅里叶频谱分析结果。

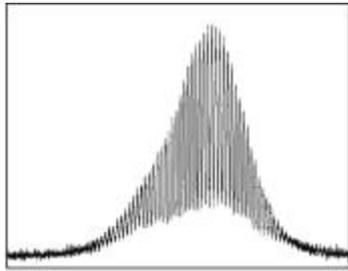


图 6 风扇转动频率为 33.3 Hz(10.4 m/s)时的拍频信号

Fig.6 Heterodyne signal with fan rotation frequency at 33.3 Hz (10.4 m/s)

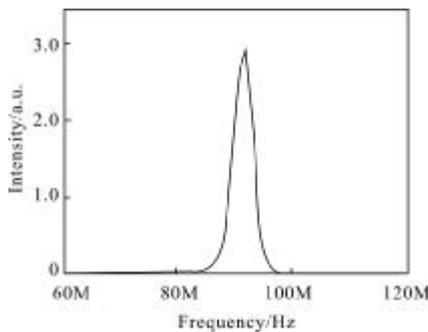


图 7 风扇转动频率为 33.3 Hz(10.4 m/s)时拍频信号的 FFT 频谱分析结果

Fig.7 FFT spectrum of the heterodyne signal with fan rotation frequency at 33.3 Hz (10.4 m/s)

表 1 和表 2 分别为风扇正向和反向转动时,风扇的标称转动速度以及实验测得的风扇转动速度。

实验中采用相干探测得到的风扇转速与风扇标称转动速度存在一定的差异,绝对误差小于 1 m/s。在风扇反向转动条件下,实测速度与风扇标称转动速度的误差相对较大,特别是在风扇转动频率

表 1 风扇正向转动时数据处理的结果

Tab.1 Results when the fan is in forward rotation

Rotational frequency of fan/Hz	Actual speed of the fan/m·s ⁻¹	Center frequency of heterodyne signal /MHz	Variance /MHz	Measured speed/m·s ⁻¹
0	0	94.778 2	0.112 5	0
16.7	5.2	96.509 3	0.145 6	5.4
33.3	10.4	98.342 8	0.069 4	10.7
50	15.7	100.030 4	0.124 5	15.8
65	20.4	101.516 7	0.131 5	20.2

表 2 风扇反向转动时数据处理的结果

Tab.2 Results when the fan is in reverse rotation

Rotational frequency of fan/Hz	Actual speed of fan/m·s ⁻¹	Center frequency of heterodyne signal /MHz	Variance /MHz	Measured speed/m·s ⁻¹
0	0	94.778 2	0.112 5	0
16	5.2	93.151 5	0.131 2	4.9
33	10.4	91.541 7	0.086 7	9.8
50	15.7	89.732 3	0.190 8	15.2
65	20.4	88.424 9	0.213 3	19.2

为 65 Hz(20.4 m/s)时,实际测量速度的误差为 1.2 m/s,这主要是由于在反演计算风扇的转动速度时,将照射到风扇上的激光光束与回波信号的角度默认为 45°,与实际值有一定的差异,这将导致实际的测量结果与风扇的理论转动速度产生较大的误差。由于傅里叶变换分辨率以及激光器自身频率稳定性的影响,实验中得到的频差同样会存在一定的误差,因而使得每一次测量的结果都会有一定的差异,但是可以通过多次测量求平均的方法减小这些影响带来的误差。此外,由于照射到风扇上的激光光斑并非一个理想的点(光斑直径 1 mm 左右),使得反射回波信号中包含不同的多普勒频移信息,这也是实验中产生测量误差的一个重要原因。

3 结 论

文中利用种子注入技术研制了一套 Tm,Ho:YAP 种子注入激光器。在注入锁定后,获得了重复频率 100 Hz、单脉冲能量 2.8 mJ、脉冲宽度 289 ns 的 2.13 μm 单频脉冲激光输出。利用这套激光器作

为激光发射光源,以风扇作为模拟探测目标进行了激光多普勒测速实验研究。得到了在风扇的不同转动速度条件下,本振光与信号光的拍频信号,并根据拍频信号反演出了运动目标的速度信息。对不同转速条件下被测目标的实测速度与理论速度进行了对比分析,同时指出了存在测量误差的原因,对 $2\ \mu\text{m}$ 激光多普勒测风雷达的研制具有重要意义。

参考文献:

- [1] Zhang H Y, Wang J F, Zhao C M, et al. Coherent solid-state lidar and its application in Doppler velocity measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(3): 284-288. (in Chinese)
- [2] Ni S X, Li Y F. Trend of laser radar for military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(2): 111-114. (in Chinese)
- [3] Wang J F, Zhang H Y, Zhao C M, et al. Injection seeding Nd:YAG laser and it's application in heterodyne detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 32 (2): 186-190. (in Chinese)
- [4] Chen W B, Zhou J, Liu J Q, et al. Doppler lidar and it's all solid-state single frequency laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 57-60. (in Chinese)
- [5] Dai Y J. The Principle of Lidar [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2002: 3-6. (in Chinese)
- [6] Wang Z G. Study on $2\ \mu\text{m}$ injection-locked solid state laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 8-11.
- [7] Ma Z F, Zhang C X, Zhang Z Y, et al. Signal-noise ratio in optical heterodyne detection[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 889-892. (in Chinese)
- [8] Wang J F, Yang S H, Zhang H Y, et al. Coherent solid-state imaging laser radar system [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(12): 2196-2199. (in Chinese)
- [9] Sammy W H, Paul J M S, Charley P H, et al. Coherent laser radar at $2\ \mu\text{m}$ using solid-state lasers [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 4-15.
- [10] Sammy W H, Stephen M H. Advanced coherent lidar system for wind measurements [C]//SPIE, 2005, 5887: 1-10.

下期预览

超声吸收引起的声光偏转器指向偏差研究

马 晶,王 健,谭立英,于思源,姜义君

(哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术国防科技重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 分别在不考虑晶体超声吸收及考虑超声吸收和超声功率角分布的情况下,建立了声光相互作用方程。运用空间傅里叶变换方法推导出衍射光场与入射光场在空频域下的传递函数。仿真结果表明,超声吸收使得衍射光光强峰值位置偏离光束中心,光强不再呈高斯分布,会引起卫星光通信发射端的指向偏差。通过研究超声功率和频率与衍射光光强分布的关系发现,超声功率选取某一数值时可以消除峰值位置偏差,将此功率值定义为最优超声功率 P_{opt} 。求出声光偏转器整个工作频带内的 P_{opt} 并进行多项式拟合,得到了最优超声功率与超声频率的关系。按照该多项式关系同步调节超声频率与功率可以补偿超声吸收引起的指向偏差。