

引用格式: DONG Xiaoyue, LIU Shuang, BI Guojiang, et al. Single-frequency Nd:YAG Pulsed Laser at 1 116 nm[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(1):0114002

董啸岳,刘爽,秘国江,等. 1 116 nm 单频脉冲 Nd:YAG 激光器[J]. 光子学报, 2024, 53(1):0114002

# 1 116 nm 单频脉冲 Nd:YAG 激光器

董啸岳,刘爽,秘国江,王克强,毛小洁

(中国电子科技集团公司第十一研究所,北京 100015)

**摘要:**针对共振荧光测风雷达的探测需求,设计和研制了种子注入的 Nd:YAG 电光调 Q 单频 1 116 nm 脉冲激光器,采用带偏置电压反馈的扫描-触发谐振探测技术,建立了 1 116 nm 单纵模振荡,并对中心频率稳定性进行分析。最终实现输出 1 116 nm 激光单脉冲能量 6.48 mJ,重复频率 60 Hz,输出线宽为 33.2 MHz,脉冲宽度为 75.7 ns。通过波长计测量输出光波长,波长稳定在 1 116.297 9 nm 附近。利用外差拍频,测定 120 min 中心频率稳定性(均方根)为 818.3 kHz。该激光器输出光通过三倍频可变换至 372 nm,作为铁共振荧光多普勒测风激光雷达的发射光源,频率抖动量对应的风速测量误差小于 1 m/s。

**关键词:**固体激光器;单频激光器;种子注入;频率稳定性;多普勒雷达

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20245301.0114002

## 0 引言

全固态单频激光器可实现大能量的单频脉冲激光输出,具有结构紧凑、抗环境扰动性强的优点,在大气测风雷达领域起着至关重要的作用,且有利于实现大气测风雷达的车载化与机载化<sup>[1-2]</sup>。作为测风激光雷达的光源,其中心频率稳定性、线宽稳定性、抗环境扰动能力,直接关系到大气测风激光雷达的分辨率、稳定水平与精确度,相关问题已成为了研制新型大气测风雷达的关键。目前,种子注入是实现固体激光器单频输出的最常用手段,其原理是:将一束单频特性优良的低功率种子光注入到从动腔,主动改变腔长并同步探测腔内的腔模匹配状况,在从动腔纵模与种子光频率匹配最佳时,触发 Q 开关,即可输出单频激光。常用的主动腔长控制技术有建立时间最小化(Q-Switch Build-Up Time Reduction, QBUTR)、Pound-Drever-Hall (PDH)、扫描-触发(Ramp-Fire, RF)等<sup>[3]</sup>。其中,建立时间最小化技术系统结构最为简单,对器件要求低,但在环境噪声的影响下难以实现长时期单频运转;PDH 技术探测腔频率与种子光的混频信号,反馈调节腔长以控制频率失配量,可以实现较高的频率稳定性,但对于法布里-珀罗参考腔的要求较高;扫描-触发技术直接对谐振腔长进行扫描,并探测腔模和种子光频率的匹配程度,在匹配最佳时触发 Q 开关。扫描-触发技术具有一定的抗环境干扰能力,且系统结构较为简单实用。

随着掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)的出现,单频固体激光器得到了长足发展。相关研究主要集中于 1 064 nm,作为 Nd:YAG 晶体中的高增益谱线,1 064 nm 可通过三倍频变换到 355 nm 波段,在平流层测风中已得到成熟应用<sup>[4-6]</sup>。但长期以来,基于 Nd:YAG 其他谱线的测风雷达研究受到的关注较少。

近年来,铁共振多普勒荧光激光雷达作为一种新型测风雷达,被认为是探测中间层顶部到热层底部(Upper Mesosphere and Lower Thermosphere, UMLT)区域的新型手段。以 UMLT 区域的铁原子和铁离子为示踪物,激发并探测共振荧光信号,就能反演该区域大气温度、风速等信息<sup>[7-9]</sup>。为了精确地探测大气风速,铁共振多普勒荧光激光雷达需要 372 nm 单频脉冲紫外激光作为发射光源。Nd:YAG 的 1 116 nm 谱线经过非线性三倍频后,与铁的 372 nm 吸收谱线仅有 GHz 量级的频率差<sup>[10]</sup>。因此,实现基于 Nd:YAG 的

基金项目:国防科技基础加强计划基金(No. E2020XXXXX40)

第一作者:董啸岳, [dxyoptics@outlook.com](mailto:dxyoptics@outlook.com)

通讯作者:王克强, [wkq519@139.com](mailto:wkq519@139.com)

收稿日期:2023-07-04;录用日期:2023-08-16

<http://www.photon.ac.cn>

1 116 nm 单频固体激光输出,成为研制铁共振多普勒荧光激光雷达的关键。由于钕离子的 1 116 nm 谱线对应跃迁的受激发射截面小,在与其他谱线的竞争中处于弱势,长期以来对于 1 116 nm 激光器的相关研究较少。2013 年,LIU Wenbin 等利用 Nd:YAG 陶瓷实现了 248 W 的 1 116 nm 准连续输出<sup>[11]</sup>;同年,ZHANG Huanian 等基于 Nd:YAG 陶瓷实现了 1 112 nm 与 1 116 nm 的双波长连续光输出<sup>[12]</sup>。2017 年,德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luftund Raumfahrt,DLR)的 BERND K 等报道了利用建立时间最小化技术实现的 1 116 nm 单频脉冲激光注入<sup>[10]</sup>,但缺乏有关频率稳定性数据的相关报道。

为研制用于探测 UMLT 区域径向风速的铁共振荧光多普勒激光雷达,要求径向风速系统误差在 3 m/s 内,对应的 1 116 nm 激光中心频率稳定性均方根(Root Mean Square,RMS)在 1 MHz 以内<sup>[13]</sup>。本文设计并研制了用于产生 372 nm 紫外脉冲光源的 1 116 nm 全固态单频脉冲激光器,该激光器以分布式反馈(Distributed Feedback Laser,DFB)光纤激光器作为种子源,采用带偏置电压反馈的扫描-触发谐振探测技术建立单频振荡。经过长时间测量,激光器输出波长稳定,中心频率稳定性良好。

## 1 Nd:YAG 晶体的能级结构

Nd:YAG 为四能级结构,其简化能级图如图 1 所示,在多条谱线中应用最成熟的是 1 064 nm,跃迁始自  ${}^4F_{3/2}$  能级的  $R_2$  分量,终止于  ${}^4I_{11/2}$  能级的  $Y_3$  分量。除此之外,还有 946 nm、1 319 nm 两条较强的谱线,分别对应  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  以及  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  的能级跃迁。

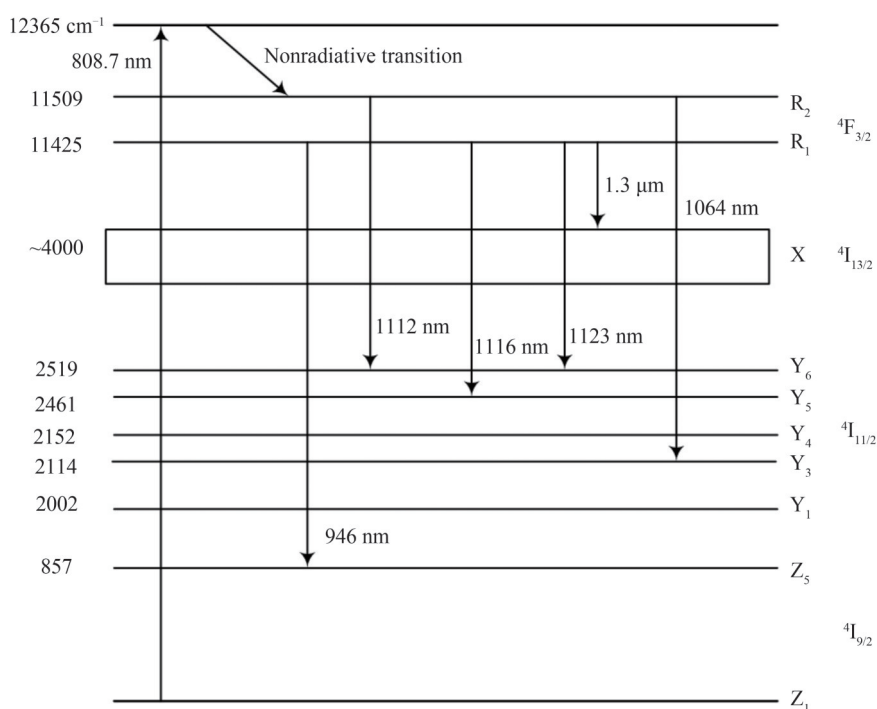


图 1 Nd:YAG 的简化能级图

Fig. 1 Schematic energy level diagrams of Nd:YAG

Nd:YAG 的 1 116 nm 谱线同样始自  ${}^4F_{3/2}$  能级,终止于  ${}^4I_{11/2}$  能级,对应的斯塔克能级为  $R_1 \rightarrow Y_5$ ,在 1 116 nm 谱线附近还存在 1 112、1 123 nm 两个临近波长谱线。室温下,如果不增加选择性损耗,Nd:YAG 激光器将在最强的 1 064 nm 波段工作,其振荡阈值低于其他谱线。以相对性能衡量,室温下 1 064 nm 谱线相对性能为 100,1 116 nm 谱线相对性能为 46。根据 KOECHNER W 关于调 Q 激光振荡器的理论<sup>[14]</sup>,Nd:YAG 激光器产生能级跃迁的阈值条件为

$$P_{th,i} = \frac{(L_i - \ln R_i) Ah\nu_p}{2\sigma_i \tau_i \eta_p \eta_T \eta_a \eta_B} \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中, $L_i$ 代表往返损耗,包括反射镜、增益介质对光束的吸收损耗、衍射损耗和散射损耗; $R_i$ 为输出耦合镜的

反射率;  $A$  为激光棒的横截面积;  $h\nu_p$  代表泵浦光的单光子能量;  $\sigma_i$  为受激发射截面;  $\tau_i$  为上能级荧光寿命;  $\eta_p$  为泵浦效率,与用于泵浦的 808 nm 半导体激光器(Laser Diode, LD)的固有特性相关;  $\eta_T$  为泵浦辐射的转移效率;  $\eta_a$  为吸收效率,代表增益介质对泵浦辐射的有效吸收程度;  $\eta_B$  为交叠效率,代表谐振腔模与激光介质的增益分布之间的空间交叠程度。由于效率参数主要与 LD 和增益介质的特性以及耦合程度有关,在讨论不同跃迁的阈值时,可用总泵浦效率  $\eta_{pe}$  表示总的效率因子,即  $\eta_{pe} = \eta_p \eta_T \eta_a \eta_B$ ,式(1)改写为

$$P_{th,i} = (L_i - \ln R_i) \frac{Ah\nu_p}{2\sigma_i \tau_i \eta_{pe}} \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

考虑 1 064 nm 谱线与 1 116 nm 谱线,上能级均处于  ${}^4F_{3/2}$  能级,故上能级荧光寿命  $\tau_i$  相等; Nd:YAG 激光器输出不同波长时,效率因子  $\eta_{pe}$  变化相对有限,其阈值主要与跃迁的受激发射截面  $\sigma_i$ 、往返损耗  $L_i$  以及输出耦合镜反射率  $R_i$  相关<sup>[15]</sup>。1 064 nm 对应的受激发射截面  $\sigma_1 = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 大于 1 116 nm 对应的受激发射截面  $\sigma_2 = 0.3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ <sup>[16-18]</sup>。因此需要增大 1 064 nm 光波在腔内的往返损耗和输出耦合镜对于 1 064 nm 的透过率。往返损耗中,增益介质对光束的吸收损耗随波长变化的改变量可忽略不计,主要可通过在输入镜镀 1 064 nm 增透膜,增大输入镜对于 1 064 nm 的损耗。

综上所述,为了建立 1 116 nm 波长的单频振荡,首先需要在谐振腔腔镜镀 1 116 nm 增反、1 064 nm 增透膜,抑制 Nd:YAG 的优势谱线起振。对于临近谱线 1 112 nm 和 1 123 nm,它们的受激发射截面与 1 116 nm 近似,且通过光学镀膜无法在几个 nm 的波长差上,产生足够的透过率差值,需要进一步通过种子注入的方式,利用单频种子光及对腔长的主动控制,使从动腔纵模频率与 1 116 nm 相匹配,以建立 1 116 nm 的单纵模振荡。

## 2 实验装置

激光器装置结构如图 2 所示。单频连续种子源采用分布式反馈光纤激光器,可输出线宽为 3.30 kHz,功率为 1.5 W 的 1 116 nm 激光,光谱信噪比 79 dB,种子光输出光谱如图 3 所示。采用一个隔离度为 60 dB 的隔离器,以避免后向散射光对种子源产生影响。经过隔离器先后有一半波片(Half Wave Plate, HWP)和  $\lambda/4$  波片(Quarter Wave Plate, QWP)用来调节进入从动腔的种子光的偏振态,以调节干涉波形的强度与对比度。

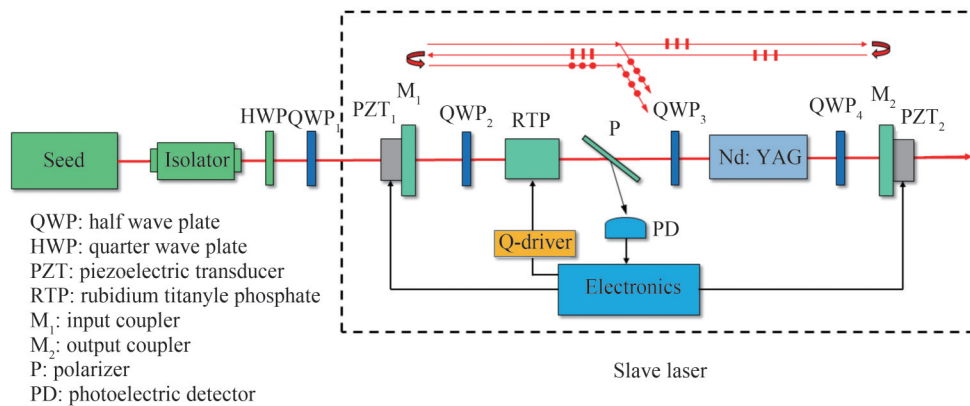


图 2 激光器结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of laser device

从动谐振腔采用直腔结构,输入耦合镜( $M_1$ )为 1 116 nm 透过率 3% 的平镜,输出耦合镜( $M_2$ )为 1 116 nm 透过率 49% 的平镜,均对于 1 064 nm 作了增透处理,透过率曲线如图 4、5 所示。腔长  $L=54 \text{ cm}$ ,腔长控制装置由两个压电陶瓷和电控模块构成。谐振腔的腔镜固定在压电陶瓷(Piezoelectric Transducer, PZT)上,可以产生微米量级的腔长变化。起偏器 P(Polarizer)将种子光的垂直分量反射出腔外,水平分量先后经过  $M_2$  与  $M_1$  的反射后再次到达起偏器 P,在此过程中变为垂直分量而同样被完全反射出腔外。腔外的光电二极管(Photodiode, PD)探测这两部分反射光的干涉强度。增益介质采用  $\varphi 4 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 晶体,掺杂

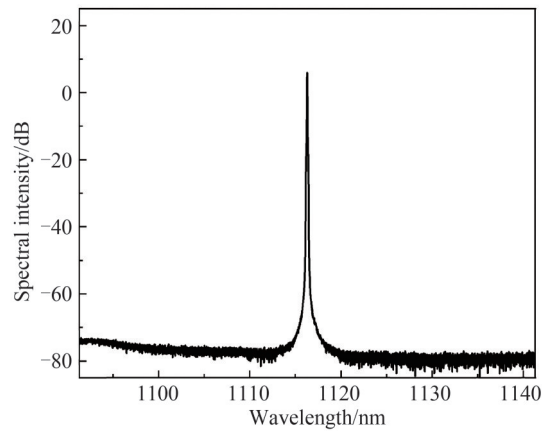


图3 种子光输出光谱  
Fig. 3 spectrum of seed

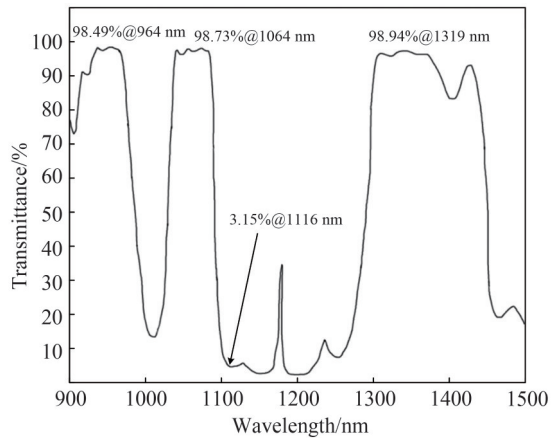


图4 输入耦合镜 $M_1$ 的透过率曲线  
Fig. 4 The transmission curve of the output coupler  $M_1$

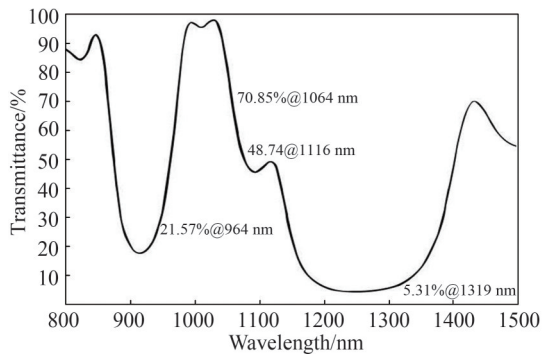


图5 输出耦合镜 $M_2$ 的透过率曲线  
Fig. 5 The transmission curve of the output coupler  $M_2$

浓度(原子数分数)为1.0%,采用LD阵列侧面泵浦方式,共计采用25个单根最大电流100 A、最大峰值功率100 W的Bar条,LD泵浦宽度为200  $\mu$ s。晶体两端镀有1116 nm & 808 nm增透膜。利用水冷控温至24  $^{\circ}$ C,经过实验测试,Nd:YAG晶体棒在此温度下对808 nm抽运光有较高的吸收率。晶体前后各放置一个1/4波片(QWP<sub>3</sub>与QWP<sub>4</sub>),波片快轴方向与水平方向成45 $^{\circ}$ ,以形成扭转模腔结构,消除空间烧孔<sup>[19]</sup>。起偏器P、电光晶体RTP与 $M_1$ 后的1/4波片,三者组成Q开关。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 种子注入的实现

实验中调节HWP和QWP<sub>1</sub>,将种子光的调节为椭圆偏振光,在PZT<sub>1</sub>上施加梯形扫描电压用以扫描腔长。由于压电陶瓷存在着迟滞效应,控制电压从扫描到保持时的拐角所包含的高频成分会引起压电陶瓷的振荡,使得电压上升及下降过程中的位移偏离线性变化,引起了频率抖动。因此实验使用改进后的ramp-fire方案,增加一个用于反馈控制的PZT<sub>2</sub>,在PZT<sub>2</sub>上施加直流偏置电压用来补偿压电陶瓷迟滞导致的非线性位移<sup>[20]</sup>,确保各周期调Q触发位置的一致性。

图6为实现种子注入的谐振探测信号示意图,触发信号频率设置为60 Hz。具体过程为:在LD开始抽运130 μs后,对PZT<sub>1</sub>施加梯形扫描电压,扫描电压上限设置为100 V,周期设置为100 μs。腔长扫描开始后,控制电路即对PD探测到的干涉信号进行微分和检测,干涉信号周期 $\tau_T$ 约为20 μs。在PZT<sub>1</sub>的振动下,腔模匹配度发生动态变化,使两部分反射光的相位差发生改变,从而使干涉图样的强度随着腔长改变而变化。当干涉强度最大时,对应着从动腔纵模频率与1 116 nm种子光匹配最佳的时刻。实验中,为了避免压电陶瓷的启动振荡对第一个干涉周期产生干扰,将干涉波形第二个周期的波峰处设置为触发调Q信号的时间节点,即扫描开始20 μs后开始出现的干涉峰值才能触发Q开关。检测到极大值时,输出晶体管-晶体管逻辑电路(Transistor-Transistor Logic, TTL)信号,该信号分别传至补偿电路与调Q电路。补偿电路在PZT<sub>2</sub>上施加直流偏置电压,以补偿腔长漂移,实验中发现直流偏置电压调节为+10 V时,补偿效果最佳;调Q电路使Q开关打开,此时腔长与种子光频率匹配最佳,1 116 nm振荡将率先建立,并通过增益饱和和限制其他波长的起振,输出1 116 nm单频脉冲。

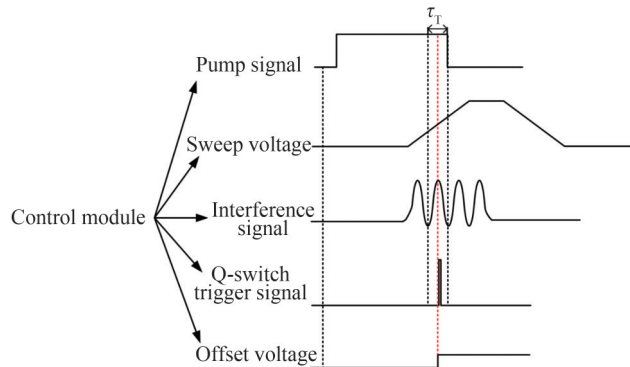


图6 谐振探测信号示意图

Fig. 6 Schematic of ramp-fire signal

在60 Hz的重复频率下进行实验研究,图7为单脉冲能量随LD泵浦电流的关系,输出能量随泵浦电流

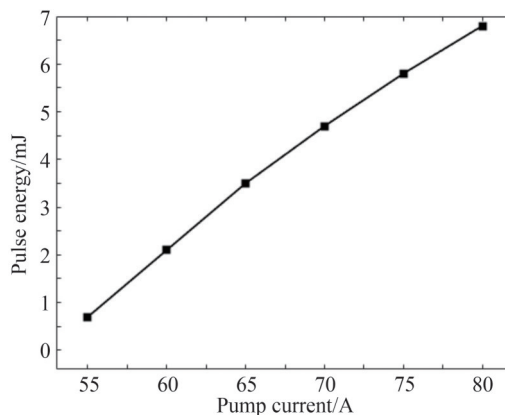


图7 输出能量与泵浦电流关系

Fig. 7 Output energy versus pump current



增大而增加。过大的泵浦电流会导致热透镜效应显著,为了防止器件在长时间测试中损坏,实验将泵浦电流选取为 78 A,24 小时能量稳定性测试结果如图 8 所示,输出 1 116 nm 脉冲能量的平均值 6.48 mJ,能量抖动的标准差为 0.25 mJ。

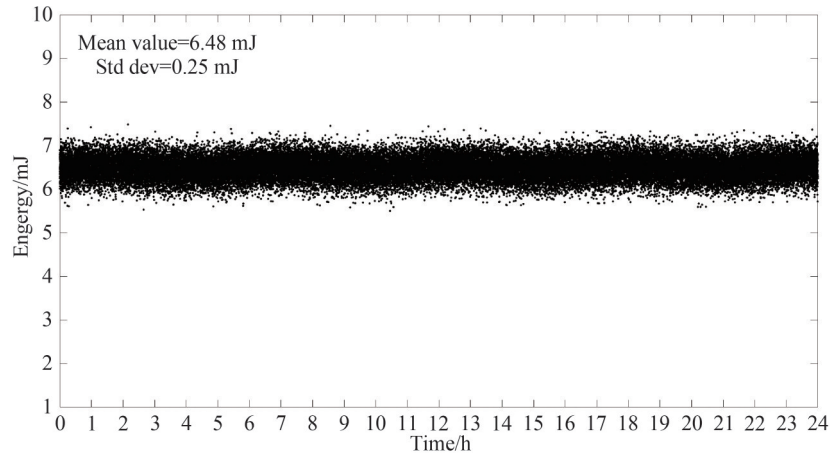


图 8 能量稳定性测试  
Fig. 8 Energy stability diagram

使用 5 GHz 带宽的铟镓砷(InGaAs)探测器和带宽为 16 GHz 的 WaveMaster 816Zi-A 示波器观察输出脉冲波形。如图 9 所示,种子注入前,输出多纵模脉冲,波形存在调制尖峰;种子注入成功后,脉冲建立时间提前,输出单纵模脉冲,波形光滑,脉宽为 75.7 ns。将输出光衰减后,利用 HighFinesse 公司的 WS-7 波长计对输出波长测量,经过 35 min 的测量,输出波长长时间稳定于 1 116.297 9 nm 附近,结果如图 10 所示。激光器输出 1 116 nm 激光的能量与波长均有较好的稳定性。

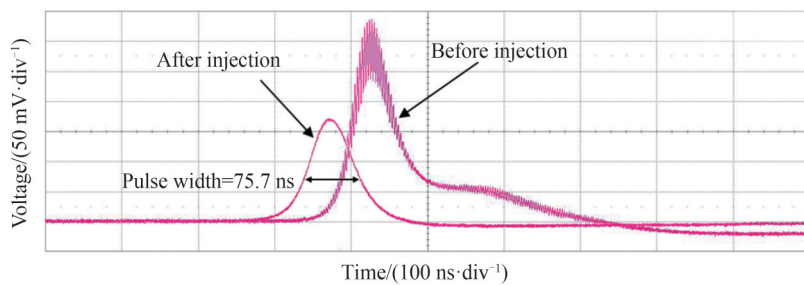


图 9 激光器脉冲波形  
Fig. 9 Pulse profile of laser

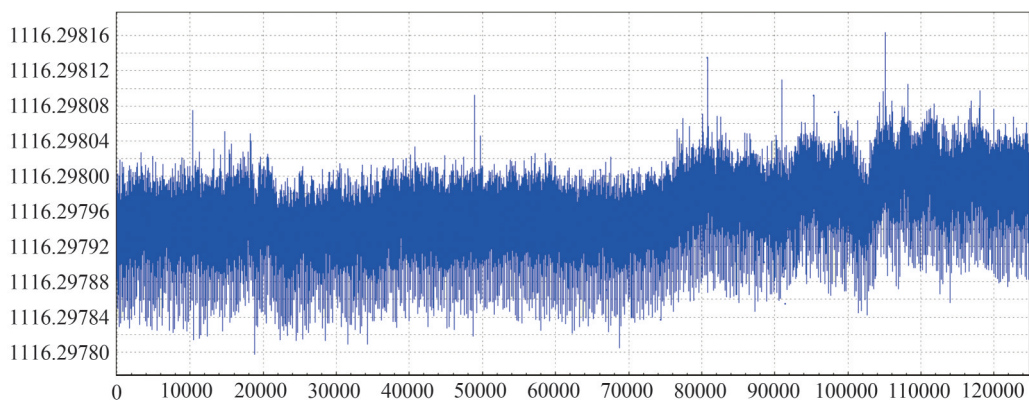


图 10 输出激光波长  
Fig. 10 Wavelength of output laser

### 3.2 频率稳定性测定

共振荧光激光雷达不仅要求激光发射源输出单纵模脉冲激光,还对激光发射源的中心频率稳定性提出要求。在风速测量过程中,需要利用共振荧光谱线在中心频率和两翼频率上的有效散射截面比值,计算得到风速的响应函数。因此,雷达发射光源的中心频率抖动,会在对有效截面的探测过程中引入系统误差。研究分析表明,1 MHz的中心频率抖动,会导致0.32 m/s的径向风速误差<sup>[13]</sup>。

实验中需要观测MHz以内的中心频率抖动,干涉仪与波长计的精度难以满足测量要求,而实验采用的种子激光器本身具有极窄的线宽与良好的频率稳定性,可以作为频率参考对象。因此实验采用了外差拍频的方式,将种子源分束,其中CH<sub>1</sub>作为频率参考,移频后与谐振腔输出的1 116 nm脉冲激光混频以测定拍频信号,拍频光路如图11所示。种子光的分束CH<sub>2</sub>注入从动腔,建立单纵模调Q脉冲。通过声光移频器(Acoustic Optical Modulator, AOM)将种子光分束CH<sub>1</sub>相对于CH<sub>2</sub>引入1.17 GHz的频移,以缩小拍信号周期,便于拍信号的采集。混频信号通过5 GHz带宽的铟镓砷(InGaAs)探测器转换为电信号,由WaveMaster 816 Zi-A示波器进行采集,采集到稳定的拍频信号,如图12所示。利用示波器的快速傅里叶变换功能,得到拍频信号的频谱信息。对频谱数据进行拟合,如图13所示,输出线宽为33.2 MHz。

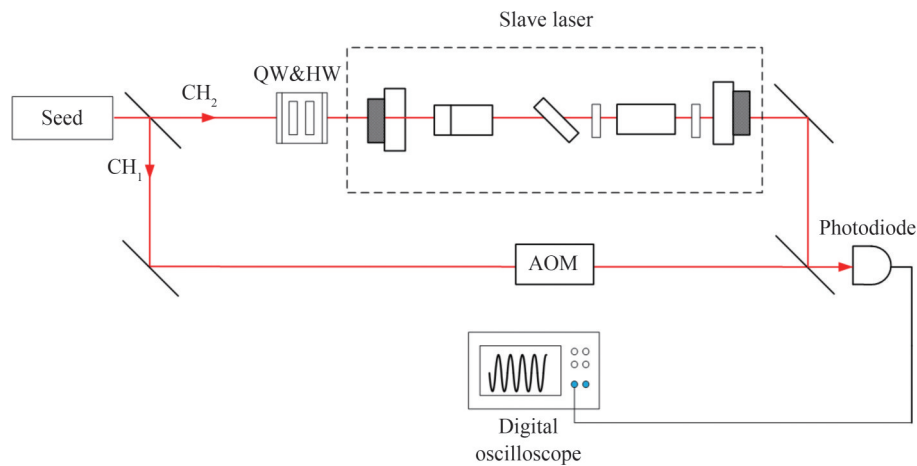


图11 拍频测量装置示意图

Fig. 11 Structural schematic of beat frequency measurement device

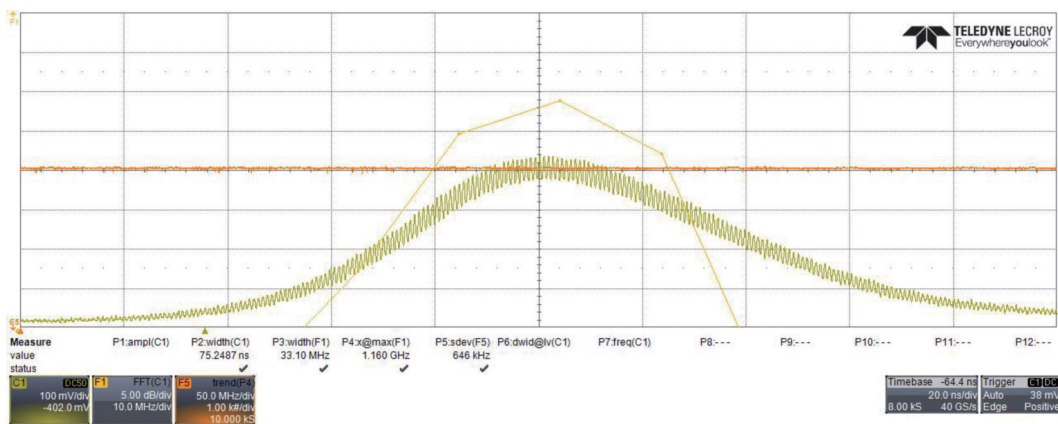


图12 拍频信号

Fig. 12 Beat frequency signal diagram

在测量过程中,记录频谱中心频率对应的坐标,就可以得到中心频率的抖动情况。图14为120 min的中心频率稳定性测量结果,拍频率的平均值为1.156 GHz,与移频量1.17 GHz相近;频率稳定性(RMS)为818.3 kHz。

结果表明,实验搭建的1 116 nm单纵模脉冲激光器能够在较长时间内保持均方根在1 MHz以内的频率

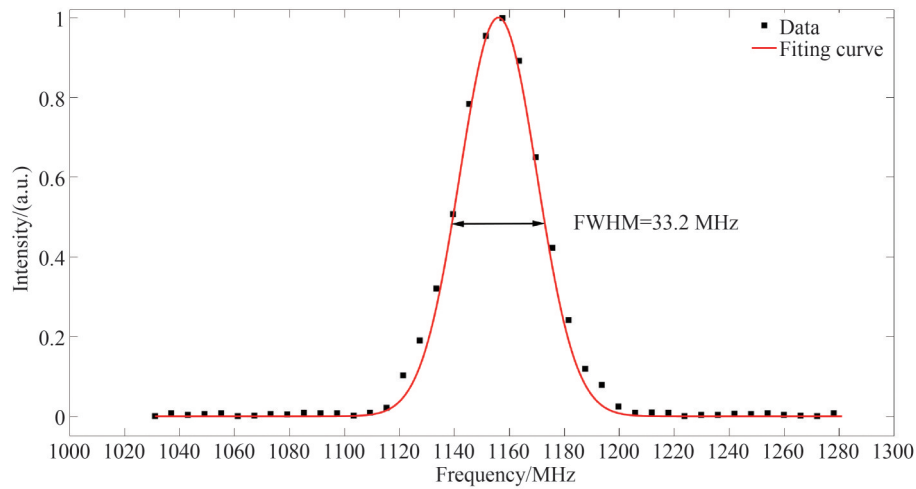


图 13 外差拍频信号的频谱  
Fig. 13 Spectrum of heterodyne beat signal

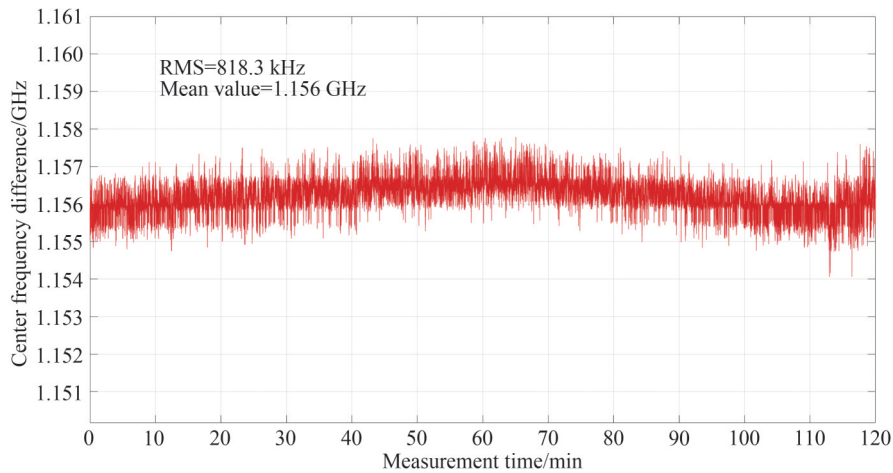


图 14 频率稳定性测量结果  
Fig. 14 Frequency stability measurement

稳定性。说明通过应用带直流偏置电压反馈的扫描-触发腔长控制方案,能够有效控制从动腔与种子光的频率失配量,实现 1 116 nm 单频种子光的注入。同时,实验中发现,冷却水压的变化、平台振动和工作温度变化,可能会对谐振腔等效腔长产生扰动,均对种子注入效果有明显的影响。818.3 kHz 的中心频率抖动主要由 PD 对干涉信号的探测误差、泵浦强度及冷却强度的不均匀等原因导致,通过优化散热结构、精确控制激光器温湿度环境,可进一步优化频率稳定性。

## 4 结论

本文设计了种子注入的 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 单频 1 116 nm 脉冲激光器,在重复频率为 60 Hz、LD 工作电流为 78 A 的条件下,输出 1 116 nm 激光单脉冲能量为 6.48 mJ,能量抖动标准差为 0.25 mJ,脉冲宽度为 75.7 ns。利用外差拍频方式测试频率特性,测量得到线宽为 33.2 MHz,120 min 的中心频率稳定性(RMS)为 818.3 kHz。该激光器实现了全固态结构,具有良好的工作稳定性,频率稳定性指标符合共振荧光测风雷达要求,经多级能量放大和 372 nm 非线性频率变换后,可以作为铁共振荧光测风雷达的激光光源。

### 参考文献

- [1] DING Jianyong, YU Guangli, ZHANG Lei, et al. Research progress and application of all solid-state narrow-width single-frequency lasers [C]. 2018 Optical Technology and Application Symposium and Interdisciplinary Forum, 2018: 142-150.



- 丁建永,于广礼,张雷,等.全固态窄线宽单频激光器研究进展与应用[C].2018年光学技术与应用研讨会暨交叉学科论坛,2018:142-150.
- [2] LONG Jiangxiong, LI Gang, YANG Bin, et al. Research progress of seed-injected all-solid-state single-frequency pulsed lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 7-14.  
龙江雄,李刚,杨彬,等.种子注入的全固态单频脉冲激光器研究进展[J].激光与光电子学进展,2018,55(9):7-14.
- [3] ED B. An introduction to pound-drever-hall laser frequency stabilization[J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79-87.
- [4] NICKLAUS K, MORASCH V, HOEFER M, et al. Frequency stabilization of Q-switched Nd:YAG oscillators for airborne and spaceborne lidar systems[C]. SPIE, 2007:6451.
- [5] HOVIS F E, EDELMAN J, SCHUM T, et al. Recent progress on single frequency lasers for space and high altitude aircraft applications[C]. SPIE, Solid State Lasers XVII: Technology and Devices, 2008:68710E.
- [6] LEMMERZ C, LUX O, REITEBUCH O, et al. Frequency and timing stability of an airborne injection-seeded Nd:YAG laser system for direct-detection wind lidar[J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 9057-9068.
- [7] CHU Xinzhaoh, PAN Weilin, PAPAN G, et al. Fe Boltzmann temperature lidar: design, error analysis, and initial results at the North and South Poles[J]. Applied Optics, 2002, 41(21): 4400-4410.
- [8] LAUTENBACH J, HÖFFNER J. Scanning iron temperature lidar for mesopause temperature observation[J]. Applied Optics, 2004, 43(23): 4559-4563.
- [9] LAUTENBACH J, HOEFFNER J, MENZEL P, et al. The new scanning iron lidar, current state and future developments[C]. European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 2005, 590:327-329.
- [10] KAIFLER B, BÜDENBENDER C, MAHNKE P, et al. Demonstration of an iron fluorescence lidar operating at 372 nm wavelength using a newly-developed Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(15): 2858-2861.
- [11] LIU Wenbin, ZHANG Di, LI Jiang, et al. High power single wavelength ceramic Nd:YAG laser at 1116 nm[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 46(1): 139-141.
- [12] ZHANG Huanian, CHEN Xiaohan, WANG Qingpu, et al. Continuous-wave dual-wavelength Nd:YAG ceramic laser at 1112 and 1116 nm[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(10): 94-96.
- [13] LI Cheng, WU Decheng, LIU Shuang, et al. Frequency stability study of the laser source for iron resonant fluorescent Doppler lidar[J/OL]. Infrared and Laser Engineering, <https://kns.cnki.net/kcms/detail//12.1261.TN.20230217.1456.002.html>  
李乘,吴德成,刘爽,等.铁共振荧光多普勒激光雷达光源的频率稳定性研究[J/OL].红外与激光工程,<https://kns.cnki.net/kcms/detail//12.1261.TN.20230217.1456.002.html>
- [14] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 78-94.  
克希耐尔.固体激光工程[M].北京:科学出版社,2002:78-94.
- [15] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 895-912.
- [16] SINGH S, SMITH R G, VAN U L G. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature[J]. Physical Review B, 1974, 10(6): 2566-2572.
- [17] LI Shutao, ZHANG Xingyu, WANG Qingpu. Discussion on effective stimulated emission Cross sections for R<sub>2</sub>→Y<sub>3</sub> transitions in Nd:YAG crystals[J]. Laser and Infrared, 2004, 34(2): 157-158.  
李述涛,张行愚,王青圃.关于Nd:YAG晶体R<sub>2</sub>→Y<sub>3</sub>跃迁有效受激发射截面的讨论[J].激光与红外,2004,34(2):157-158.
- [18] KRUPKE W F, SHINN M D, MARION J E, et al. Spectroscopic, optical, and thermomechanical properties of neodymium-and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet[J]. Journal of the Optical Society of America. B, 1986, 3(1): 102-114.
- [19] EVTUHOV V, SIEGMAN A E. A twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. Applied Optics, 1965, 4(1): 142-143.
- [20] ZHOU Jun. Study of injection-seeded single frequency all solid-state laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007.  
周军.种子注入的全固态单纵模激光器研究[D].北京:中国科学院研究生院,2007.

## Single-frequency Nd:YAG Pulsed Laser at 1 116 nm

DONG Xiaoyue, LIU Shuang, BI Guojiang, WANG Keqiang, MAO Xiaojie  
(The 11th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Stable single-frequency all-solid state laser plays an important role in resonance fluorescence lidar. Owing to the advantages of compact and stable structure, all-solid single-frequency lasers have been developed rapidly in lidar vehicle-borne and airborne applications. Recently, a scheme for tripling 1 116 nm laser to obtain the light source for iron resonance fluorescence lidar has been developed. There is a neodymium-doped yttrium aluminum (Nd:YAG) garnet emission line lies at 1 116 nm, which is within only a few gigahertz (GHz) of the tripled wavelength of the absorption line of iron at 372 nm. Therefore, the design of 1 116 nm single-frequency laser and the measurement of frequency characteristics is essential for iron lidar. We demonstrated a stable single-frequency 1 116 nm Nd:YAG laser in this paper. An optimized ramp-fire scheme is applied to realize the seed injection and frequency jitter control. This single-frequency laser has a compact all-solid structure and a good stability to be as fundamental frequency applied in iron lidar.

The 1 116 nm single-frequency laser system mainly includes three parts: a distributed feedback fiber laser as the 1 116 nm seed, a side-pumped Nd:YAG straight-cavity slave laser and a detection-control system module. The fiber laser provides a stable 1 116 nm continuous laser with a spectral signal-to-noise ratio at 79 dB. A set of wave plates is placed between seed and slave cavity to adjust the polarization before entering slave cavity. The total cavity length is set to 54 cm with two piezoelectric transducers placed on two cavity mirrors. The detection-control system module detects the match degree between seed laser and slave cavity longitudinal mode while one piezoelectric transducer vibrating. When the interference between seed and the light reflected through the cavity reaches a maximum, detection-control system turns on the Q-switch and applies a direct current voltage to the other piezoelectric transducer to compensate for the nonlinear vibration. Then the 1 116 nm single-frequency pulse is established.

The realization of 1 116 nm single-frequency laser is shown. The laser produces 6.48 mJ energy at 60 Hz repetition with a pulse width of 75.7 ns. The envelop of the pulse waveform becomes smooth after seed injection because only one longitudinal mode is established. After 24 hours' measurement, the mean energy is 6.48 mJ with a standard deviation of 0.25 mJ. The wavelength is measured by a WS-7 wavelength meter and the output wavelength is stable around 1 116.297 9 nm. In lidar detection, the frequency jitter of light source directly affects the systematic error in lidar detection. So the frequency characteristics are measured in detail by heterodyne beat frequency. The full width at half maximum of spectrum is 33.2 MHz and the center frequency stability (root mean square) is 818.3 kHz, corresponding less than 1 m/s error in wind speed measurement.

In this study, a 1 116 nm single-frequency pulsed laser is designed and developed based on the seed injection technology, in which the Nd:YAG laser is side-pumped by 808 nm LD array. The obtained pulse energy is 6.48 mJ at a repetition rate of 60 Hz, and the corresponding pulse duration is 75.7 ns. The standard deviation of the energy jitter is 0.25 mJ and the center frequency stability (root mean square) is 818.3 kHz. The laser's working stability meets the requirements of lidar detection. The 372 nm iron resonance fluorescence lidar light source can be obtained by frequency tripling 1 116 nm single-frequency laser.

**Key words:** Solid state laser; Single-frequency laser; Seed injection; Frequency stability; Doppler radar

**OCIS Codes:** 140.3460; 140.3480; 140.3530; 140.3570