

文章编号: 1001-3806(2016)02-0153-04

## 脉冲激光器种子注入状态检测装置与实验研究

潘艺升<sup>1,2</sup>, 闫召爱<sup>1</sup>, 郭文杰<sup>1,2</sup>, 徐轻尘<sup>1\*</sup>, 胡雄<sup>1</sup>

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心 临近空间环境研究室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 地球科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 为了解决非注入状态激光脉冲对非相干多普勒激光雷达测风结果可靠性的影响, 利用注入与非注入状态激光脉冲建立时间不同的原理, 设计和实现了一种脉冲激光种子注入状态检测器, 其时间测量精度为 45ps, 测量时间范围为 3.5ns ~ 2500ns, 最高脉冲重复频率为 1kHz。利用该检测器对某型号 Nd:YAG 脉冲激光器进行了种子注入状态检测实验, 结果显示注入(非注入)状态脉冲建立平均时间为 123.27ns(134.44ns), 1.35h 内非注入状态激光脉冲占总激光脉冲比例为 8.54%。结果表明, 该脉冲激光种子注入状态检测器能够有效地检测出非注入状态的激光脉冲, 对于提高激光雷达测风可靠性具有潜在的价值。

**关键词:** 激光技术; 种子注入状态检测; 激光脉冲建立时间; 多普勒测风激光雷达

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.001

### Pulse laser injection seeded state detector and experimental research

PAN Yisheng<sup>1,2</sup>, YAN Zhaoai<sup>1</sup>, GUO Wenjie<sup>1,2</sup>, XU Qingchen<sup>1</sup>, HU Xiong<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Nearspace, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To avoid the influences of unseeded laser pulses on wind speed measurement of incoherent Doppler wind lidar, a detector of pulse laser injection seeded state was designed and implemented based on the principle of different laser pulse building time of the injection seeded and unseeded state. The time measurement accuracy of the detector was 45ps, time measurement range was from 3.5ns to 2500ns, and the highest pulse repetition rate was up to 1kHz. The experiment of injection seeded state detection was conducted with the detector. The results show that laser pulse building time of the injection seeded state is 123.27ns, less than 134.44ns of the unseeded state. The proportion of injection unseeded laser pulses to total laser pulses is 8.54% within 1.35h. The pulse laser injection seeded state detector can effectively detect and discriminate the injection seeded and unseeded laser pulses. The detector has a potential value to improve wind speed measurement reliability of Doppler wind lidar.

**Key words:** laser technique; injection seeded state detection; laser pulse building time; Doppler wind lidar

### 引言

非相干多普勒测风激光雷达采用窄线宽、高功率脉冲激光器发射激光信号, 利用高光谱分辨率器件(例如碘分子吸收光谱仪、法布里-珀罗干涉仪)检测大气散射回波信号的多普勒频移来探测大气风场<sup>[1-4]</sup>。发射激光脉冲的线宽影响高光谱分辨率器件对回波信号多普勒频的检测<sup>[5-6]</sup>。为了获得窄线宽、高功率的发射激光脉冲, 多数激光雷达采用种子注入技术<sup>[7-9]</sup>。但

是由于受环境变化等因素的影响, 采用种子注入技术的激光器难以实现每个激光脉冲都处于注入状态。在激光雷达观测过程中, 需要累积多个激光脉冲的回波信号以获得较高的信噪比。如果在这些累积的激光脉冲中存在一些非注入状态的脉冲, 则会影响激光雷达风场测量结果的可靠性。

为了获得 100% 的注入状态的窄线宽脉冲激光, CHEN 等人<sup>[10]</sup>在激光器中采用了谐振探测技术, 即判断激光处于注入状态后再打开调 Q 开关, 取得了很好的效果。如果采用这种技术, 则可以避免上述非注入状态激光脉冲对激光雷达测风可靠性的影响。

本文中给出了一种用于检测激光器每个输出激光脉冲种子注入状态的新技术装置。利用该装置对激光器进行了注入状态检测实验, 成功获得了其注入状态和非注入状态脉冲的特性。通过对每个激光脉冲的注入状态和非注入状态进行识别, 激光雷达在数据后处

基金项目: 高分专项青年创新基金资助项目; 国家八六三高技术研究发展计划资助项目; 国家自然科学基金资助项目(4104100)

作者简介: 潘艺升(1989-), 男, 硕士研究生, 现主要从事临近空间环境、激光雷达的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xqc@nssc.ac.cn

收稿日期: 2015-01-26; 收到修改稿日期: 2015-02-12

理时可以将非注入状态脉冲的回波信号剔除,从而提高激光雷达风场测量结果的可靠性。

## 1 种子注入状态检测方法

### 1.1 种子注入技术原理

种子注入技术是指将单纵模低功率的种子光在高功率激光脉冲建立周期的初始时刻,注入到激光器谐振腔中,以获取高功率单纵模脉冲激光输出的一种激光模式控制技术。注入的单纵模种子光在谐振腔中再生放大,抑制了自发辐射形成的其它激光模式,从而达到获取高功率单纵模激光脉冲输出的目的<sup>[11-14]</sup>。

图1是具有种子注入技术的Nd:YAG激光器原理图。种子激光器输出的种子激光经过法拉第隔离器后分成两路,一路直接注入到Nd:YAG激光器谐振腔中,另一路经过光电二极管转换成电信号后输入到种子注入控制器。种子注入控制器通过Q开关信号获取谐振腔内的激光脉冲建立时间,并根据激光脉冲建立时间建立改变谐振腔腔长的电压值,反馈给控制谐振腔腔长的压电陶瓷晶体。根据激光脉冲建立时间最短原理对激光器谐振腔腔长进行控制,达到种子注入的效果,输出单纵模激光。

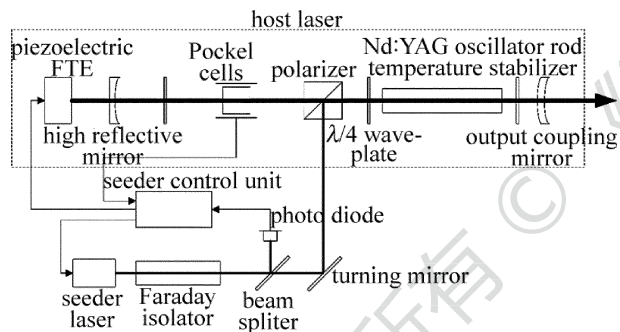


Fig. 1 Schematic diagram of Nd:YAG laser with seeded injection

目前,多数具有种子注入技术的激光器在实际使用过程中,受到环境因素等影响,种子注入是一个动态的调整过程,会出现多模激光脉冲情况<sup>[15]</sup>。作者的主要目的是通过检测激光器的注入状态,挑选出多模激光脉冲,仅使单纵模激光脉冲在激光雷达的测量中发挥作用。

### 1.2 种子注入状态检测方法

当脉冲激光器的调Q开关打开时,激光脉冲建立起来,同时也进行了模式的选择。模式n的功率达到 $P_n$ 时所用的时间t可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$t = \sqrt{\frac{2T(\ln P_n - \ln P_{on})}{dg_n}} + t_n \quad (1)$$

式中, $P_{on}$ 为模式建立时的初始功率,T为该模式在谐振腔内的往返时间, $g_n$ 为模式n的增益系数, $t_n$ 为模

式n的净增益达到1时所需的时间。

由于种子光的作用, $P_{on}$ 比较大, $t_n$ 比较小,所以其模式达到 $P_n$ 时所用的时间t就比较小。即在注入状态下激光脉冲的建立时间比非注入状态下要小,激光脉冲建立时间长短的不同直接反映了输出激光脉冲的种子注入状态和非注入状态。

因此,通过测量Q开关信号起始时间与激光脉冲信号响应时间的时间差,即激光脉冲建立时间 $t_d$ ,并设定区分注入状态与非注入状态的时间阈值 $t_{th}$ ,可判定该激光脉冲是否处于注入状态:(1)当 $t_d < t_{th}$ 时,注入状态;(2)当 $t_d \geq t_{th}$ 时,非注入状态。

图2是使用示波器对某型号Nd:YAG脉冲激光器的激光脉冲建立时间测量结果,横坐标是相对时间,单位为ns,纵坐标是电压,单位为V。图中虚线是Q开关信号,点线是注入状态下的激光脉冲信号,实线是非注入状态下的激光脉冲信号。注入状态激光脉冲建立时间为105.30ns,非注入状态激光脉冲建立时间为114.48ns。可以看出,注入状态下的激光脉冲信号比非注入状态下的激光脉冲信号形成的时间较短。这说明利用激光脉冲建立时间来区分注入和非注入状态的方法是可行的。

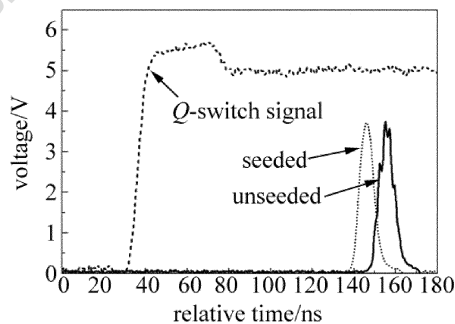


Fig. 2 Injection seeded and unseeded laser pulse signal

## 2 脉冲激光种子注入状态检测器

从图2中可以看出,区分激光脉冲注入状态和非注入状态要求检测器件具有9.8ns时间差分分辨能力以及120ns时间测量能力。为了更清楚地获取激光器的种子注入状态的时间特性,本文中的脉冲激光种子注入状态检测器的最小时间分辨率为1ns。

根据上述指标要求,作者设计了一种种子注入状态检测器。该检测器工作原理图如图3所示。从Q开关激光器中引出Q开关触发信号作为脉冲激光种子注入状态检测器的计时触发信号,利用快速响应光电二极管采集激光脉冲信号作为计时停止信号,这两个信号的时间间隔记为激光脉冲建立时间。种子注入状态检测器获取这两个信号的时间间隔数据,通过串口通讯协议(universal asynchronous receiver/transmit-

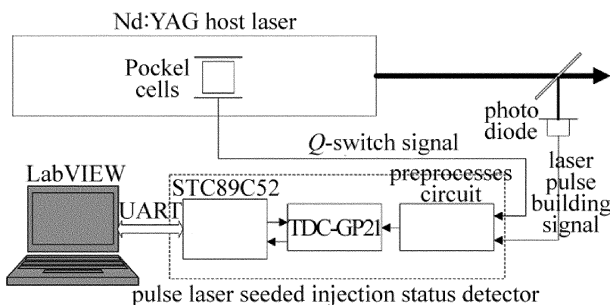


Fig. 3 Work principle of pulse laser injection seeded state detector, UART) 上传到上位机激光器种子注入状态实时检测软件。激光器种子注入状态实时检测软件负责激光脉冲建立时间的记录存储以及种子注入状态的判断。

脉冲激光种子注入状态检测器硬件主要包括:信号预处理电路、时间数字转换电路、数据采集及传输电路等 3 个部分,如图 4 所示。

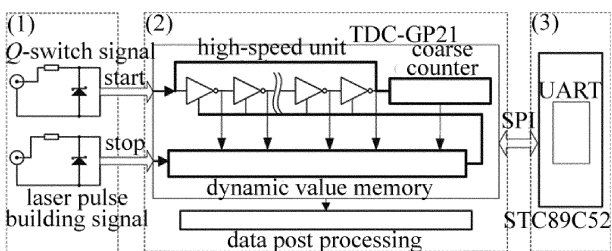


Fig. 4 Schematic diagram of pulse laser injection seeded state detector

信号预处理电路由稳压二极管和限流电阻组成,用于调理输入信号的电压幅值,使其电压幅值满足时间数字转换及数据采集电路对电压幅值的要求(小于 3.3V)。由于激光器的 Q 开关触发信号的电压幅值为 15V,测量激光脉冲的光电探测器的输出电压可达到 10V,因此需要对这两路信号进行电压调理,达到保护后端数字信号处理电路的目的。

时间数字转换电路主要部件为 TDC-GP21 计时芯片,该芯片利用时间数字转换原理(time-to-digital converter, TDC)来精确测量激光器的 Q 开关触发信号与激光脉冲信号之间的时间间隔。TDC-GP21 是一款具有脉冲时间差测量功能的时间数字转换芯片,精度为 45ps,测量时间范围为 3.5ns ~ 2500ns,最高测量频率为每秒钟一百万次。

数据传输电路由 STC89C52 单片机与串口传输电路组成。STC89C52 单片机控制芯片通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)协议与 TDC-GP21 芯片进行通信,作用是配置计时芯片的工作模式参量,控制测量的流程,读取存储在 TDC-GP21 时间数字转换芯片内部寄存器时间差数据,并通过串口将数据上传到激光器种子注入状态实时检测软件。设定串口传输的波特率为 115200symbol/s,换算的传输速率约为 7kbyte/ps,最高能达到每秒 1000 个脉冲数据的传输能力。

上述检测器可达到的技术指标见表 1。

Table 1 Main specifications of pulse laser injection seeded state detector

parameter	value
time measurements accuracy	45ps
time measurement range	3.5ns ~ 2500ns
laser pulse repetition rate	<1kHz

### 3 实验结果和讨论

2014 年 6 月,利用脉冲激光种子注入状态检测器对某型号 Nd:YAG 脉冲激光器的注入状态进行了测试。按图 3 的连接方式连接种子注入状态检测器和激光器。该激光器输出重复频率 30Hz、波长 532nm、脉冲宽度约 7ns 的激光。取该激光器的 Q 开关信号作为脉冲激光种子注入状态检测器的触发信号,采用美国 Thorlabs 公司的高速探测器 DET10A 采集激光脉冲信号,作为脉冲激光种子注入状态检测器的停止信号,由上位机激光器种子注入状态实时检测软件存储激光脉冲建立时间数据,并判别种子注入状态。

实验过程分为 3 个阶段:(1)打开种子激光器,激光器进入注入工作状态,连续工作 0.85h;(2)关闭种子激光器,激光器进入非注入工作状态,连续工作 0.5h;(3)再次打开种子激光器,连续工作 0.5h。激光脉冲建立时间测量结果如图 5 所示,横坐标为测量时间,单位为 h;纵坐标为激光脉冲建立时间,单位为 ns。图 5 显示,在脉冲激光器注入工作状态下,多次出现非注入状态的激光脉冲。

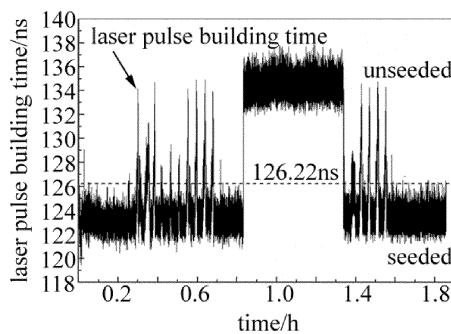


Fig. 5 Measuring result of laser pulse building time

为了解种子注入状态和非注入状态时脉冲建立时间的统计特性,分别截取测量过程中 1.1h ~ 1.3h 内处于非注入状态与 1.6h ~ 1.8h 内处于注入状态的激光脉冲建立时间进行统计。图 6 中给出了脉冲建立时间的分布及其高斯拟合曲线,横坐标为激光脉冲建立时间,单位为 ns;纵坐标为激光脉冲数量。从图 6 中可以看到,注入状态下激光脉冲的建立时间满足高斯分布,其高斯拟合函数的平均值为 123.27ns、标准差为 0.59ns;非注入状态的建立时间也满足高斯分布,其平均值为 134.44ns、标准差为 0.66ns;两种状态下的激

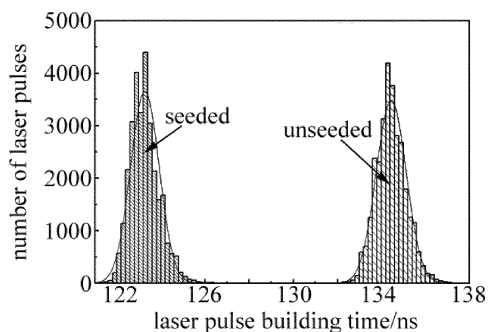


Fig. 6 Statistics histogram of idealized injection seeded state and unseeded state

光脉冲建立平均时间相差约为 11.17ns。

这里取注入脉冲建立时间的平均值加上其 5 倍标准差(即  $t_{th} = 126.22\text{ns}$ )作为区分注入状态与非注入状态的时间阈值。如第 1.2 节中所述,对于该激光器,若激光脉冲建立时间大于 126.22ns,则认为该激光脉冲处于非注入状态;若激光脉冲小于等于 126.22ns,则认为该激光脉冲处于注入状态。利用该时间阈值统计得到,在种子注入工作状态的 1.35h 内,出现非注入状态的激光脉冲所占的总激光脉冲的比例为 8.54%。

上述初步实验结果说明,该检测器可以成功检测种子注入激光器输出脉冲的注入状态和非注入状态;该激光器在种子注入工作模式下,存在不可忽略的 8.54% 的输出脉冲属于非注入状态。

如果采用该激光器作为测风激光雷达的发射激光器,在没有对其脉冲的注入状态加以判别和区分的情形下,不可忽略的非注入状态脉冲会影响激光雷达测风结果的可靠性。应用上述种子注入脉冲检测器技术可以实时检测种子激光的注入状态,获取每一个输出激光脉冲的状态信息;同时,将种子注入检测的结果与后端激光雷达回波信号采集程序结合,当检测到输出的激光脉冲为非注入状态时,信号采集程序将此激光脉冲的回波信号剔除,通过这样的方式,可以使激光雷达所采集的信号都确保为 100% 注入状态激光脉冲的回波信号,从而避免了非注入状态脉冲对激光雷达测风结果可靠性的影响。

#### 4 结 论

针对非相干多普勒激光雷达所用的种子注入窄线宽、高功率脉冲激光器,首次设计并实现了一种种子注入状态检测器。该检测器的时间测量精度为 45ps,测量时间范围为 3.5ns ~ 2500ns,最高重复频率可达 1kHz。利用该检测器对某型号 Nd:YAG 脉冲激光器进

行了种子注入状态检测实验,结果显示,在 1.35h 实验期间内,该激光器输出 8.54% 非注入状态脉冲。实验结果表明,该检测器可以有效检测和判别脉冲激光注入状态,从而提高激光雷达测风结果的可靠性,在非相干多普勒测风激光雷达中具有潜在的应用价值。

#### 参 考 文 献

- [1] CHANIN M L, GARNIER A, HAUCHECORNE A, *et al.* A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, 16(11): 1273-1276.
- [2] CHOI S, BAIK S, PARK S, *et al.* Development of single-filter Doppler signal discrimination method for incoherent Doppler lidar system[J]. *Optica Applicata*, 2012, 42(3): 545-553.
- [3] DU J, REN D M, ZHAO W J, *et al.* Theoretical description of improving measurement accuracy for incoherence Mie Doppler wind lidar[J]. *Chinese Physics*, 2013, B22(2): 024211.
- [4] TANG L, WU H B, SUN D S, *et al.* Design and calibration of the Fabry-Perot etalon in Rayleigh backscattering Doppler wind lidar[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 283-288 (in Chinese).
- [5] WANG Q, WANG Q, CHENG Y L. Effect of transmitted laser linewidth on wind measurement of direct detection lidar using double-edge technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(11): 1851-1854 (in Chinese).
- [6] WANG Q, WANG Q, CHENG Y L. Influence of transmitted-laser linewidth on sensitivity and error of double-edge wind lidars[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2008, 29(4): 390-397.
- [7] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 223 (in Chinese).
- [8] WANG J T, ZHU R, ZHOU J, *et al.* Conductively cooled 1kHz single-frequency Nd:YAG laser for remote sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(8): 081405.
- [9] HAYASHI S, NAWATA K, SAKAI H, *et al.* High-power, single-longitudinal-mode terahertz-wave generation pumped by a microchip Nd:YAG glaser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2881-2886.
- [10] CHEN W B, ZHOU J, LIU J Q. Doppler lidar and it's all solid-state single frequency laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 57-60 (in Chinese).
- [11] BARNES J C, BARNES N P. Injection seeding. I. Theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(10): 2670-2683.
- [12] GUO S F, LIN W X, LI Q. Single axial and transverse mode electro-optic Q-switched laser based on injection-seeding technique and self-filtering unstable resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(12): 1585-1589 (in Chinese).
- [13] LIU Z, WU S, LIU B. Seed injection and frequency-locked Nd:YAG laser for direct detection wind lidar[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(3): 541-545.
- [14] DAI T Y, JU Y L, YAO B Q, *et al.* Single-frequency, Q-switched Ho:YAG laser at room temperature injection-seeded by two F-P etalons-restricted Tm, Ho:YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1850-1852.
- [15] WANG T. Injection seeded Q-switch laser system principle and technology research[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001: 10-15 (in Chinese).