

波长1 064 nm和532 nm脉冲激光大动态范围能量的测试方法及实验

周国清 谭逸之 周祥 李伟豪 李先行 林港超 胡皓程 张烈平 农学勤 杨家志

Testing method and experiment of large dynamic range energy of pulsed laser with wavelength of 1 064 nm and 532 nm

Zhou Guoqing, Tan Yizhi, Zhou Xiang, Li Weihao, Li Xianxing, Lin Gangchao, Hu Haocheng, Zhang Lieping, Nong Xueqin, Yang Jiazhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200417>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光大光斑辐照空间碎片冲量耦合特性研究

Analysis of the impulse coupling characteristics of space debris irradiated by pulsed laser with big spot
红外与激光工程. 2018, 47(12): 1243001–1243001(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1243001>

脉冲激光周向探测地面目标捕获建模与仿真

Modeling and simulation of acquisition for ground target by pulsed laser circular-viewing detection
红外与激光工程. 2018, 47(2): 206001–0206001(11) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0206001>

超短脉冲激光烧蚀冲量耦合测量方法

Methods of extreme short pulse laser ablation impulse coupling measurement
红外与激光工程. 2017, 46(3): 329002–0329002(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0329002>

激光引信窄脉冲光源驱动电路设计

Design of narrow pulse light source driving circuit of laser fuze
红外与激光工程. 2018, 47(S1): 16–22 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.S106004>

激光脉冲串对电荷耦合器件积累损伤效应研究

Damage accumulation effects of multiple laser pulses irradiated on charged coupled device
红外与激光工程. 2017, 46(10): 1003002–1003002(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201747.1003002>

1 064 nm波长白天卫星激光测距试验

Experiment of satellite laser ranging in daytime based on 1 064 nm wavelength
红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200021–1–20200021–6 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200021>

波长 1 064 nm 和 532 nm 脉冲激光 大动态范围能量的测试方法及实验

周国清^{1,2}, 谭逸之¹, 周 祥^{1,2}, 李伟豪¹, 李先行¹, 林港超¹, 胡皓程¹, 张烈平¹, 农学勤³, 杨家志¹

- (1. 桂林理工大学 机械与控制工程学院, 广西 桂林 541006;
2. 天津大学 微电子学院, 天津 300072;
3. 桂林激光通信研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 激光能量测量中能量计的量程受限, 无法兼顾大动态范围能量的测量。在光电法测量的基础上, 提出了一种基于 APD 和 PMT 光电探测器的激光能量测量方法, 该方法通过分析光电探测器的探测性能及其与后续处理电路之间的相互作用关系, 可以完成对 1 064 nm 和 532 nm 波段的激光能量测量。通过改变可调激光光源的脉宽、重频、泵浦功率, 观察电压信号变化, 根据跨阻放大电路的放大倍数测试出光电流大小, 利用光电探测器灵敏度与激光波长的关系找到对应的探测器灵敏度和光电转换增益以及激光的衰减倍数, 测试出激光能量值, 同时对比发射激光的脉宽、重频、泵浦功率值, 确保该计算方法的真实性。实验证明, 所提出的方法可以完成动态范围为 nJ~mJ 的激光能量测试, 且与使用能量计测试误差在 nJ 以内。

关键词: 脉冲激光; APD、PMT 探测器; 能量测试

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200417

Testing method and experiment of large dynamic range energy of pulsed laser with wavelength of 1 064 nm and 532 nm

Zhou Guoqing^{1,2}, Tan Yizhi¹, Zhou Xiang^{1,2}, Li Weihao¹, Li Xianxing¹, Lin Gangchao¹, Hu Haocheng¹,
Zhang Lieping¹, Nong Xueqin³, Yang Jiazhi¹

- (1. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;
2. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China ;
3. Guilin Institute of Laser Communication, Guilin 541004, China)

Abstract: The range of the energy meter is limited in laser energy measurement, and it cannot take into account the measurement of energy with a large dynamic range. In the photoelectric measurement, a laser energy measurement method based on APD and PMT photodetectors was proposed. The measurement of laser energy in the 1 064 nm and 532 nm bands was completed through analyzing the detection performance of the photodetector and its interaction with subsequent processing circuits by this method. The voltage signal changes were observed by changing the pulse width, repetition frequency, and pump power of the adjustable laser light source. The size

收稿日期:2021-04-08; 修订日期:2021-06-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41431179);国家自然科学基金(41961065);广西创新驱动发展专项(AA18118038, AA18242048);广西科技基地和人才专项(AD19254002);桂林市科学研究与技术开发计划(20190210-2)

作者简介:周国清,教授,硕士生导师,主要从事空间遥感以及激光雷达方面的研究。

of the photocurrent was tested according to the magnification of the transimpedance amplifier circuit. The relationship between photodetector sensitivity and laser wavelength was used to find the corresponding detector sensitivity, photoelectric conversion gain and laser attenuation multiple. The laser energy value was tested, and the pulse width, repetition frequency and pump power value of the emitted laser were compared to ensure the calculation the authenticity of the method. The experiment proves that the proposed method can complete the laser energy test with a large dynamic range nJ-mJ, and the test error is less than nJ compared with the energy meter test.

Key words: pulsed laser; APD and PMT detector; energy test

0 引言

激光雷达 (LiDAR) 测深技术近些年来在地形勘测、水深测试、军事侦查等领域应用广泛^[1]。激光能量测量属于激光技术的重要组成部分,也是研发激光器的基本工作,而在激光能量测试实验中,激光的发射能量大小直接影响测试的深度和精度。

自 1958 年, C.H.Downes 和 A.L.Sholo 团队将微波量子放大器应用到光谱范围,提出第一代激光器以后,人们将光热效应应用在光度计量领域,提出一种绝对辐射计,这种测量仪器可以探测 0.1~100 mW 的激光功率^[2]。1960 年, H. MAIMAN 等人研制了第一台红宝石激光器,它也是一种大能量脉冲固体激光器,可以发射 ns 级脉宽的激光,他们在激光能量测量时,选用了流水功率计,可以完成对 50 W 以上的连续激光功率测量^[3]。在同时期,还出现炭锥能量计^[4]和体吸收能量计^[5],这类能量计都是根据热电效应,热电元件会将吸收到的光能转化为热能,根据温度变化来计算激光能量,还可以通过温度变化导致的次级效应来测量激光能量。

1962 年, R.N.Hall 等人创造了半导体激光器,它是通过注入电流的方式来泵浦产生激光,它的激光波长范围覆盖了可见光到红外光的所有范围,最高输出光脉冲能量可达 50 W(脉宽 100 ns)^[6]。在研发半导体激光器的同时,为了计算它的发射激光能量,美国人研发了 2CU4401 型和 HP 型硅光二极管,这是第一次通过光电法进行激光能量的测量,以光电式探测器或者半导体光电二极管作为传感器件的光电式探测器^[7],光信号转换为电信号后,电信号经过电荷积分器得到与输入光脉冲能量成正比的电压信号,从而测量出激光能量值。同期出现的产品包括:连续毫瓦激光功率

计、JCS-1 型数字式脉冲激光峰值功率计、光电能量计^[8]。而国内在 1970 年开始研究光电式激光能量计,并研制出 LEM-1 型能量计,可以完成对毫秒脉冲的激光能量测量。

在 20 世纪末期, Laser Precis Son 公司用热电堆或热释电材料作为传感器的吸收性探测器,即让激光与吸收体充分作用,再用热电传感器测试吸收体的上升的温度,从而得到吸收体的热量值,即为激光能量值,并研发出 RK-3230 型热释电辐射计和 RS-3900 型电校准热释电辐射计^[9]。

笔者从项目实际需求出发,针对不同深度的水深完成激光能量测量受到能量计的量程限制,以及无法兼顾水上通道红外波段的强激光能量以及水下蓝绿波段的弱激光能量测量的问题,有针对性地对 1 064 nm 和 532 nm 的脉冲激光能量做出测试。

文中在光电法测量激光能量的基础上,针对 1 064、532 nm 的激光能量,设计了一套激光能量计算方法。该方法的理论建立在带宽大于 1 GHz 的高速光电探测理论之上,虽然不同的探测器的放大增益、灵敏度以及波长响应不同,但是光电转换理论是一样的,所以文中方法不受探测器种类限制,不受能量计量程限制,显得更加灵活。

1 激光能量的测试原理

激光能量测试的原理主要包括两个部分:高速光电探测和激光参数测量。高速光电探测原理证明该激光能量测试方法的可行性,而脉宽测试原理主要保证该方法的真实性。

激光能量测试方法的整体流程如图 1 所示。

首先,观察接收到的光电压信号大小,如果光电压信号 < 1 mV,需要外接放大电路,再进行跨阻放大

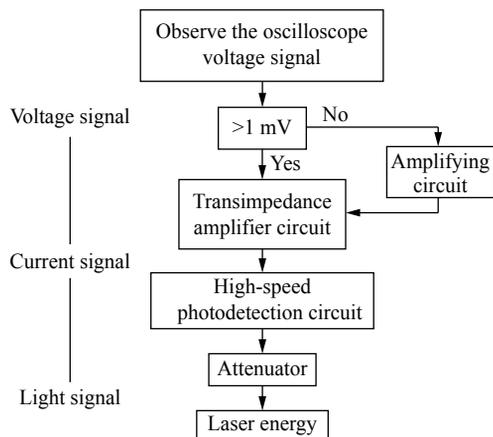


图 1 激光能量测试的设计流程图

Fig.1 Design flow chart of laser energy test

逆运算得到光电流信号。如果电压信号 $>1\text{ mV}$ ，可直接经过跨阻放大电路的逆运算计算出光电流大小。

其次，光电流经过光电检测电路的逆运算得到光信号。因为射入光电探测器靶面的激光已经经过了光学衰减器的衰减，通常衰减精度是其衰减量的 ± 0.1 倍，所以经过光电探测器靶面探测到的激光能量还需乘以衰减倍数之后才等于激光发射能量。

最终，观察发射激光的参数与可调激光器设置参数是否保持一致确认该测试方法的真实有效性。激光能量测试的整体指标见表 1。

表 1 激光能量测试的整体指标^[10]

Tab.1 Overall index of laser energy test^[10]

Experimental parameters	Main index requirements
Voltage value displayed by the oscilloscope	$>1\text{ mV}$
One-stage voltage amplifier circuit	Voltage gain more than 10 times
Transimpedance amplifier circuit	Gain 2 K, bandwidth 1 G
High-speed photoelectric detection circuit	APD conversion gain 10^5 V/W PMT conversion gain $10^2\text{-}10^7\text{ V/W}$
Attenuator	1-99 dB

1.1 高速光电探测技术

光电探测技术是把不便量化分析的光信号转化为可在示波器中可见的电信号，然后根据后续信号处理电路所需的电压值进行放大处理。

文中设计的高速光电探测电路(见图 2)由 APD 或 PMT、跨阻放大器(TIA)、比较器、电流基准、输出驱动等模块构成^[10]。

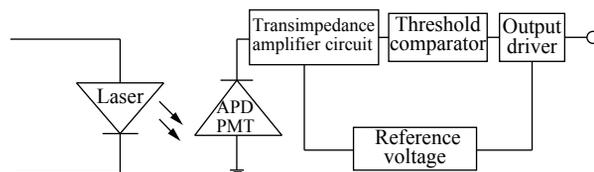


图 2 高速光电探测电路结构图

Fig.2 Circuit structure diagram of high-speed photodetection

该电路的工作原理为：改变可调激光器的泵浦能量，当光脉冲信号照射到探测器光敏面上，实现光信号到电流信号的转换，电流信号输入 TIA 电路，实现电流信号到电压信号的转换，TIA 输出的电压信号接入比较器，比较器充当模数转换器(ADC)的功能，所以当 TIA 输出达到比较器翻转阈值时，比较器就会翻转一次，从而表示光信号的探测结果^[11]。

根据光电系统辐射源的发光强度、传输介质和目标的传输及调制损耗、接收光学系统接收孔径的限制及反射吸收等损失的影响，可以测试出入射到探测器光敏面上的实际辐射能量^[12]。

1.2 激光参数测量

激光最主要的参数包括：脉宽、重复频率、泵浦功率。脉宽 t 是指激光时域脉冲上升时间 t_r 和脉冲下降时间 t_f 到它的 50% 的峰值功率点之间的时间间隔^[13]。重复频率是指激光在某个时间周期内脉冲信号触发的次数，而泵浦功率主要表示脉冲信号所搭载的能量大小。

对于不同的脉冲激光的上升时间量级和时域量程，根据对测试结果的不同要求，采用的测试方法有两类^[14]：(1) 直接测试法，采用快速探测器，将光信号转换成电信号，通过存储示波器记录其波形；(2) 采用相关函数将时间函数转换成空间函数。利用标准延迟器和光速 c 换算出其时域脉冲波形参数，并依据脉冲激光的时域波形测试获得脉冲宽度 t 等的时域参数^[15]。

文中采用直接测试法，发射激光的同步信号如图 3 所示。

脉冲激光的参数量值的测试是否准确，将直接影响最终辐射模拟光源峰值功率的结果，是影响最终测试结果的一个重要因素，也是对测试结果进行不确定性评估的一个重要分量。

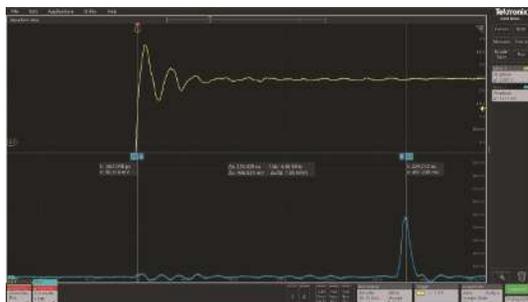


图 3 激光发射同步信号与回波信号对比图

Fig.3 Comparison of the synchronization signal and echo signal of laser emission

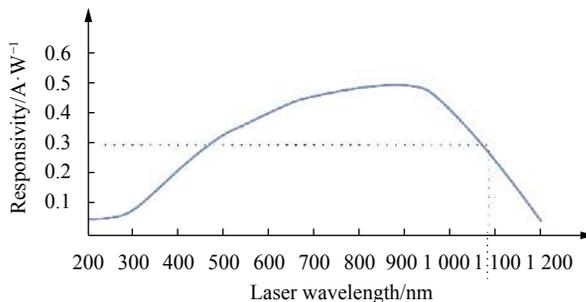


图 4 APD 激光响应度和激光波长关系图 ($M=1$)

Fig.4 Relationship between APD laser responsivity and laser wavelength ($M=1$)

2 激光能量的相关测试理论

2.1 基于 APD 探测器的激光能量测试方法

对于波长为 1064 nm 的激光能量测试,文中使用的是北京科扬公司的 KY-ARPM 系列的 APD 模块,它的内部集成了低噪声宽带跨阻放大器,输入阻抗为 50 Ω,这种封装方式可以直接输出电压信号,也可以减少暗电流、自然光以及热电阻带来的噪声干扰^[16-17]。

按照 APD 探测器的光电转换和跨阻放大过程,可以测试出激光能量,如公式 (1) 所示:

$$J^* = \eta \times \left(\frac{D \times V}{Gain} \right) \quad (1)$$

式中: J^* 为发射激光能量; η 为激光衰减倍数; D 为激光脉宽; V 为示波器探测到的电压; $Gain$ 为 APD 探测器的光电转换增益。

(1) APD 激光响应度和激光波长关系见图 4,针对波长为 1064 nm 的激光,对应的响应度大概在 0.3 A/W,而文中设计使用的 APD 模块峰值响应度为 0.5 A/W,此时它的转换增益为 10^5 V/W,说明对于 1064 nm,模块的转换增益 $Gain$ 为:

$$Gain = 1 \times 10^5 \times 0.3 / 0.5 = 6 \times 10^4 \text{ V/W}$$

(2) 以图 5 测试结果为例,示波器探测到的电压 V 在 0.552 V,激光功率 W 为:

$$W = V / Gain = \frac{0.552}{6 \times 10^4} \approx 9.217 \times 10^{-6} \text{ W}$$

(3) 激光脉宽 $D=5$ ns, 激光能量 J 为:

$$J = D \times W = 4.609 \times 10^{-14} \text{ J}$$

测试前,首先确认 APD 的阈值,防止接收到的回波信号处于饱和状态。再按照激光能量和激光功率的关系设置好对应的脉宽,经过测试电路的放大后,

选用 60 dB 叠加 30 dB 的衰减片,使激光能量衰减 9×10^8 倍。

(4) 真实激光能量 J^* 为:

$$J^* = J \times 9 \times 10^8 = 4.149 \times 10^{-5} \text{ J} = 0.04148 \text{ mJ}$$

使用能量计测出的激光能量是 0.040 mJ(见图 6),因为很多激光器的最小量程为 2 mJ,而显示数值只能到 mJ 级。实验结果证实,文中方法可测试出 1064 nm 的激光能量。

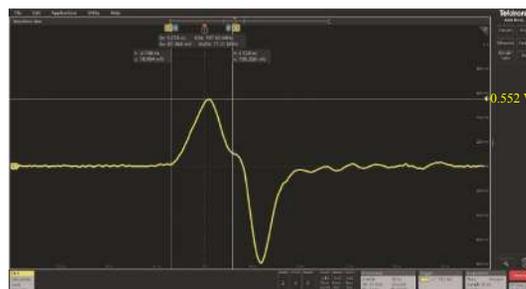


图 5 能量计测试结果

Fig.5 Energy meter test results



图 6 APD 模块接收到的电压信号

Fig.6 Voltage signal received by the APD module

2.2 基于 PMT 探测器的激光能量测试方法

对于波长为 532 nm 的激光能量测试,文中使用的是日本滨松公司的 H11526 系列的 PMT 模块,它的重复频率为 10 kHz,内部高压电源可外接一个滑动变阻器来改变模块的控制电压,方便实验时调整控制电压来改变 PMT 增益。实验过程和 APD 很类似,最大的不同之处在于 PMT 需要信号发生器对其进行时序控制,并且 PMT 的增益会随着控制电压实时改变。一般控制电压为 0.4~0.9 V,可以控制放大增益在 $10^3\sim 10^7$ 。因此 PMT 模块为电压输出型模块,内部集成的跨阻放大电路增益 D 为 $0.1\text{ V}/\mu\text{A}$ 和 $1\text{ V}/\mu\text{A}$ 。

按照 PMT 探测器的光电转换和跨阻放大过程,可以测试出激光能量,如公式 (2) 所示:

$$J = \frac{V}{\text{Gain}1 \times M} \times D \quad (2)$$

式中: M 为波长 532 nm 时 PMT 的激光响应度; D 为激光脉宽; $\text{Gain}1$ 为 PMT 的光电转换增益。

实验选用了 OPA847 芯片的放大电路,该电路的偏置电流很低,带宽为 $4.2\text{ GHz}^{[14]}$ 。放大电路采用 $\pm 6.5\text{ V}$ 供电,可以将电路输入口接上 PMT 模块的输出端,电路的输出口接入示波器。

以图 7 测试结果为例,示波器探测到的电压 V 为 0.291 V ,控制电压为 0.9 V ,PMT 的增益为 5×10^6 ,PMT 响应度与波长关系见图 8,对应 532 nm 的响应度为 40 mA/W 。PMT 模块的跨阻放大增益为 $0.1\text{ V}/\mu\text{A}$,脉宽为 5 ns 。选用 60 dB 叠加 60 dB 的衰减片,将激光功率衰减了 9×10^{11} 倍。

$$J^* = J \times \eta \quad (3)$$

(1) 与文中第 2.1 节中对 APD 的激光能量测试类似, J 为:

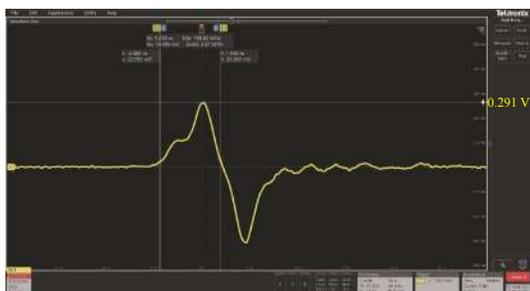


图 7 PMT 激光响应度与激光波长关系图

Fig.7 Relationship between PMT responsivity and laser wavelength

$$J = \frac{V}{\text{Gain}1 \times M} \times D \approx 7.278 \times 10^{-17}\text{ J}$$

(2) 真实激光能量 J^* (见图 9) 为:

$$J^* = J \times \eta = 6.5475 \times 10^{-5}\text{ J} = 0.0655\text{ mJ}$$

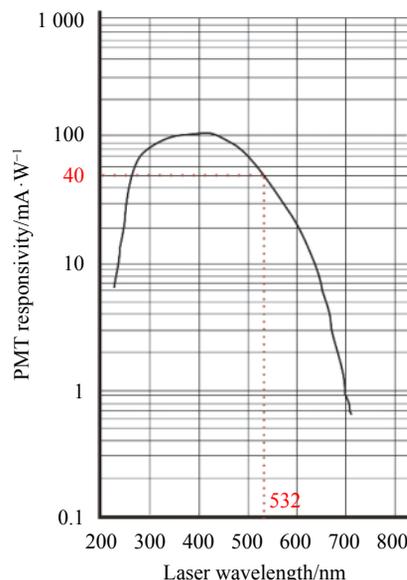


图 8 能量计测试结果

Fig.8 Energy meter test results



图 9 PMT 模块收到的电压信号

Fig.9 Voltage signal received by the PMT module

能量计测出激光能量值为 0.065 mJ ,和文中方法测试结果一致,再一次证实所提方法可用于波长 532 nm 的激光能量测试。

3 激光能量的测试

为了验证第 2 节中理论测试的正确性与真实性,笔者做出了以下两组实验: 1064 nm 和 532 nm 激光能量测试实验。实验的整体装置图见图 10。

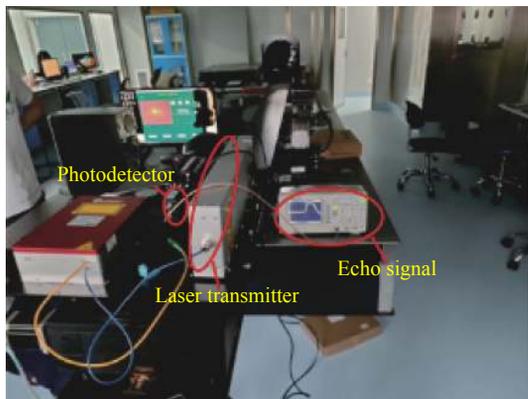


图 10 实验装置原理图

Fig.10 Overall configuration diagram of the experiment set

3.1 1064 nm 激光能量测试

波长 1064 nm 的激光能量测试需要经过以下四个步骤:

(1) 测试 1064 nm 的激光器, 将激光器连接 RS232 接口改变激光器串口至 COM3, 用线性直流电源调整激光器的电压至正常工作电压范围。激光器的上位机控制面板见图 11。

(2) 调制激光泵浦功率归零, 将泵浦功率的步进值设为 100 mW 或者 500 mW, 逐步增加激光能量来保证探测器的安全。

(3) 随后使用能量计测试激光功率, 按着测试的数值选择能量计的合适量程再做测试, 如果激光能量偏高, 则采用能量衰减片来衰减激光能量。

(4) 最后固定 APD 的接收窗口, 让激光按照固定的角度打至光敏面, 来观察示波器中的电压触发信号变化, 并记录电压数值。

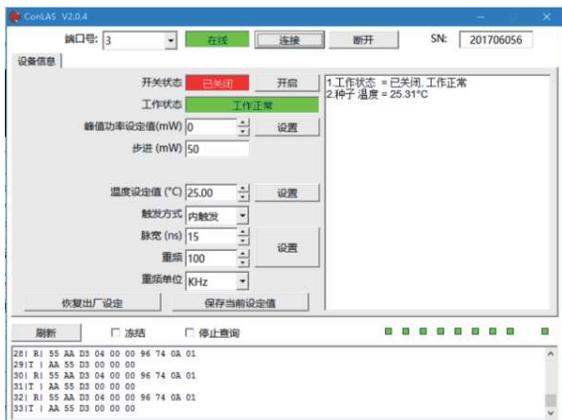


图 11 激光器的上位机控制面板

Fig.11 Upper computer control panel of the laser

3.2 532 nm 激光能量测试

532 nm 的激光器需要先对倍频器升温到 147 °C 的温度下才能正常工作, 上位机的操作和 1064 nm 的无太大区别。因为 PMT 的灵敏度比 APD 高, 它的阈值可达 nW 级, 需要选用衰减能力更强的衰减片来保证模块的正常工作, 其测试步骤如下:

(1) 按着 PMT 的工作时序图设置好信号发生器, 因为 PMT 需要门控功能来区分接收的光是由水面产生还是水底产生的, 需要在信号发生器中设置好激光射到水面所需的时间, 这个过程 PMT 处于关闭状态, 接着激光到达水面后开启门控开关, 来接收水底的回波信号。测试前, 需要在 ConLAS 软件中将触发方式改为由信号发生器来控制的外部触发。

(2) 将外界信号发生器的信号调至脉冲信号, 选择占空比 0.1%, 高电平在 3.5 ~ 5 V, 低电平选 0, 周期为 5 μs, 脉宽为 5 ns, 上升时间为 2 ns, 下降时间为 6 ns。

(3) 选择探测器时需要查看是否有门控功能, 以及门控功能是选用常开还是常闭等, 按着对应的时序图设置信号发生器参数。一般使用这种外部信号触发功能的激光实验只可用于机载实验测试, 而不适合船载测试, 因为离水面距离太近, 水面信号的门控时间无法精准控制。

(4) 另外, 要根据需要接收的激光波长波段选择合适的光电探测器, 一般选择峰值灵敏度在最接近的波段作为探测光。

3.3 误差分析

文中方法是在光电探测器的探测理论上测试激光能量值, 但是实验测试值和真值总是存在一定的误差, 为了减小这个误差, 笔者做出如下几种分析。

(1) 实验装置误差

测试装置的误差主要来源于仪器仪表的误差和电路的误差。所提方法采用了泰克公司采样率为 2.5 G/s 的示波器, 如果回波信号的重复频率过快, 有可能无法还原完整波形。另外, 光电转换电路可能因为电源纹波的干扰以及电路的虚焊导致实验误差。

(2) 环境误差

在不同的环境下测试会出现不同的实验结果, 比如探测器的灵敏度受工作温度的影响, 以及室内室外的自然光强度不同使得探测器产生的暗电流噪声不一样, 探测器的响应度也会受到干扰。

(3) 方法误差

由于人员的技术水平不够或者一些理论测试只能取近似值, 导致最终结果产生误差。

前两种由硬件设施所致, 可以选择同一实验环境, 且在封闭黑暗环境下进行实验。而方法产生的误差, 可以采取前人总结出来的经验公式对数据进行修正。如从实验 3.1 和 3.2 的测试结果中可以获得脉冲激光的时域波形, 笔者根据传统经验公式对回波信号的脉宽进行误差分析^[18]:

$$t = \sqrt{t_1^2 - t_2^2 - t_3^2} \quad (4)$$

式中: t_1 为所测时域波形的脉宽; t_2 为波形记录的上升时间; t_3 为高速光电探测器的上升时间。

根据图 10 的测试结果, 可得:

$$t = \sqrt{(5.076 \times 10^{-9})^2 - (1.24 \times 10^{-9})^2 - (5 \times 10^{-9})^2}$$

$$4.92 \times 10^{-9} \text{ s} = 4.92 \text{ ns}$$

根据 PMT 模块 (见图 12) 的测试结果, 可得:

$$t = \sqrt{(5.030 \times 10^{-9})^2 - (1.07 \times 10^{-9})^2 - (5 \times 10^{-9})^2}$$

$$4.91 \times 10^{-9} \text{ s} = 4.91 \text{ ns}$$

综上所述, 接收到的回波信号与激光发射同步信号误差均在 2% 以内, 证实回波信号的真实性。

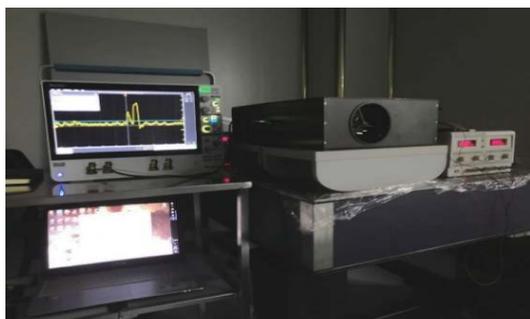


图 12 基于 PMT 模块的激光测试图

Fig.12 Laser test chart based on PMT module

4 结 论

文中设计并建立了一套基于 APD 和 PMT 探测器对波长 1064 nm 和 532 nm 的激光能量进行测试的方法。理论和实验结果表明:

它的关键技术在于使用 1 GHz 以上的高带宽低噪声的高速光电转换电路, 有足够大的动态范围, 可

以还原整个原始波形, 且在实验操作时只有激光泵浦功率这一个变量, 操作极为简便。选用的探测器的响应度分别在 532 nm 和 1064 nm 均处于优值, 在硬件层面上保证了实验的真实性, 另外使用传统的能量计测试激光能量受限于能量计的量程, 无法兼顾不同能量的激光信号, 而文中采用的测试方法就显得更为灵活, 不仅如此, 如果需要测试其他波长的激光能量时, 仅需要修改探测器和跨阻电路的芯片^[19], 选用靠近峰值响应度的探测器和与之带宽相当的跨阻芯片, 就可以按照文中方法测试激光能量, 足以体现该方法的先进性。同时, 该方法可以在光电转换的理论方面继续优化, 以达到更好的测量效果。

参考文献:

- [1] Zhou Guoqing, Zhou Xiang, Zhang Lieping, et al. Research on multi-channel flight time parallel measurement system of APD linear array lidar [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(22): 62-67. (in Chinese)
- [2] Milstein A B. Acquisition algorithm for direct-detection lidar with Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 296-311.
- [3] Gao Yongli, He Xu, Li Hongmei, et al. The influence of laser energy density on the measurement of soot particle size by laser-induced incandescent technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2425-2430. (in Chinese)
- [4] Wei Jifeng, Jiang Zhixiong, Lu Fei, et al. Design of graphite cone high energy laser total absorption energy meter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0208006. (in Chinese)
- [5] Li Nan, Qiao Chunhong, Fan Chengyu, et al. Absorption temperature characteristics of high energy long pulse laser energy meter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0406004. (in Chinese)
- [6] Xu Jie, Zhao Shanghong, Wu Jili, et al. Comprehensive fuzzy evaluation method for laser interference photodetector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(6): 34-38. (in Chinese)
- [7] Shen Wei, Wang Junzheng, Wang Zhengjun. A frequency measurement method based on signal compensation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10): 2192-2197. (in Chinese)
- [8] Wang Ruihua. The development trend of laser power meter and energy meter [J]. *Laser & Infrared*, 1988(9): 7-12. (in Chinese)
- [9] Zhou Guoqing, Zhou Xiang, Hu Haocheng, et al. Design of a LiDAR optical-mechanical system for water depth measurement

- [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203006. (in Chinese)
- [10] Gong Yong, Wang Qianqian, Shan Bin, et al. Realistic quantification evaluation scheme of laser target simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206012. (in Chinese)
- [11] Qin Haiming, Wang Cheng, Xi Xiaohuan, et al. Research progress of airborne lidar sounding technology and its application [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(4): 617-624. (in Chinese)
- [12] Li Jie, Zhao Yiqiang, Ye Mao, et al. Multi-channel processing technology for wide dynamic range signal in airborne lidar bathymetry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0301002. (in Chinese)
- [13] Li Xiangyang, Xu Jintong, Tang Yingwen, et al. GaN-based ultraviolet detectors and their research progress [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 276-280. (in Chinese)
- [14] Li Xili, Yang Bowen, Xie Xinhe, et al. Influence of waveform characteristics on LiDAR ranging accuracy and precision [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1156.
- [15] Zhao Ming, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. High spectral resolution lidar to detect atmospheric transmittance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, S1(45): S130002.
- [16] Shi Long, Chen Ning, Wang Bing, et al. Detection method of optical path parallelism of laser vehicle-mounted platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S117002. (in Chinese)
- [17] Zhang Yuxiang, Song Jiancheng, Tian Muqin. Design of multifunctional thermal resistance isolation safety barrier for mines [J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(6): 12-16. (in Chinese)
- [18] Yu Dejun, Gong Junbin, Ma Jie, et al. Research on imaging simulation technology of laser imaging radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S4): 160-166.
- [19] Guo Bailing. Application of high input impedance operational amplifier SF356 [J]. *Applications of Integrated Circuits*, 1984, 3(9): 75-85.