

文章编号: 1002-1582(2025)04-0449-07

高精度连续谱激光能量测量系统的研究

崔怡松, 吕勇*, 刘洋, 陈青山

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘 要: 为了满足连续激光的功率测量, 针对其0.4 μm 至2.4 μm 宽波段、多路输出和甚高重复频率的特点, 设计了一套专用的连续谱激光能量采集系统, 能够对连续谱激光在上述波段范围内的能量分布进行高精度检测。系统选择以氧化铜作为热电堆吸收层的探测器, 结合信号处理技术, 通过加权滑动均值滤波的算法来实现了对宽光谱激光能量的动态响应与精确分辨。通过针对671nm和1064nm波段的光能校准, 系统能够在复杂光谱条件下提供稳定的测量结果, 实验结果表明, 采用本文方案研制的激光功率测量系统的测试结果与标准激光功率计测试结果之间的误差在 $\pm 1.5\%$ 范围以内。这一结果展现测量连续谱激光能量系统的可行性。

关 键 词: 激光能量; 光热传感器; 信号处理; 数据采集

中图分类号: TH741

文献标识码: A

Research on high-precision continuum laser energy measurement system

CUI Yisong, LV Yong*, LIU Yang, Chen Qingshan

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information
Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To meet the requirements of continuous laser power measurement, a specialized energy collection system for continuous spectrum lasers is designed, which is capable of high-precision detection of energy distribution in the wavelength range from 0.4 μm to 2.4 μm , with multiple output channels and extremely high repetition frequency. The system uses a thermopile detector with copper oxide as the absorption layer, combined with signal processing techniques, and implements dynamic response and precise resolution of wide-spectrum laser energy using a weighted sliding mean filter algorithm. Through energy calibration for the 671 nm and 1064 nm bands, the system can provide stable measurement results under complex spectral conditions. Experimental results show that the measurement error between the system developed using this approach and the standard laser power meter is within $\pm 1.5\%$. This result demonstrates the feasibility of measuring a continuum laser energy system.

Keywords: laser energy; photothermal sensors; signal processing; data acquisition

0 引 言

主动激光对抗是光电对抗领域中的重要技术手段, 其通过向目标光电观瞄设备或系统发射激光, 达到干扰、致盲甚至毁伤的目的, 使目标设备暂时或永久丧失功能^[1]。这种技术在军事应用中

具有重要的价值, 可以显著削弱敌方装备的作战效能。然而, 随着光电技术的快速发展, 传统的主动激光对抗技术逐渐暴露出局限性^[2,3], 传统的主动激光对抗技术通常采用单波长或多波长激光, 其对抗波段通常依据目标设备的工作波段而设计, 例如532nm和1064nm等。随着光电系统防护技术

收稿日期: 2025-04-14; 收到修改稿日期: 2025-05-27

基金项目: 北京市自然科学基金(4244105)

作者简介: 崔怡松(2000—), 男, 硕士研究生, 从事光电检测方向。867604732@qq.com

吕勇(1971—), 男, 教授, 从事精密光机电一体化方向。

* 通讯作者: lvyong@bistu.edu.cn

的进步,许多目标设备对这些常用对抗波段的激光采取了有效的防护措施,如采用特殊滤光片或非线性材料,大幅降低了传统激光对抗系统的干扰与毁伤效果^[4]。在这种情况下,传统激光对抗技术在现代光电对抗环境中愈发显得捉襟见肘。

在此背景下,连续谱激光技术逐渐成为新型激光对抗系统的研究重点。与传统激光相比,连续谱激光具有宽波长范围的显著优势,对于发射波长可以从可见光延伸至短波红外(通常为 $0.4\mu\text{m}$ 至 $2.4\mu\text{m}$),能够覆盖目标光电系统的更大范围的工作波段。这种广谱特性使连续谱激光对目标设备的干扰和毁伤更为有效,能够突破传统波长单一激光对抗手段的局限。此外,连续谱激光还采用甚高重复频率的脉冲体制(通常达到百kHz级),通过高频率激光脉冲的持续轰击,可以进一步增强对目标设备的压制效果^[5]。这些特性使得连续谱激光成为光电对抗领域的重要突破性技术。

然而,连续谱激光的技术特点对其能量测量提出了挑战。在实际应用中,精确测量连续谱激光的能量分布是系统设计和性能评估的重要环节。首先,传统的激光功率测量设备通常设计为针对单一波长或窄波段的激光光源,对宽波长范围的连续谱激光存在响应盲区,难以实现全面覆盖。其次,甚高重复频率的脉冲激光体制要求测量设备具有极高的时间分辨率,以实时捕捉每个脉冲的能量信息,而传统测量设备的响应速度往往难以满足这一要求。

为此,本文针对连续谱激光的特点,设计了一套专用的激光能量测量系统。搭建实验平台进行实验,结果表明,该系统测量覆盖 $0.4\mu\text{m}$ 至 $2.4\mu\text{m}$ 的宽波长范围,通过优化探测器的选择与先进的信号处理技术,实现了对不同波段内激光能量的准确测量。

1 探测器分析

1.1 探测器选择分析

常见的光功率测量技术主要基于光电效应和光热效应两种手段。

光电探测器基于光电效应,利用光子与电子的相互作用来测量光功率,具有响应速度快、测量精度高等优点^[6]。然而,其响应波段受限于材料的带隙效应,无法覆盖完整的光谱范围,且具有选择性,能量转换效率相对较低。

相比之下,光热探测器基于光热效应,通过物质对光能的吸收引发温度变化,从而测量光功

率。由于其原理依赖于热效应的普遍性,光热探测器具有宽光谱响应(无选择性)的特点,即对几乎所有波长的光都能产生光热转换效应。此外,光热探测器的吸收层通常采用高吸收率材料,以最大程度提高光能转化效率。根据黑体辐射理论,理想黑体能够完全吸收所有入射光,不反射、不透射,并在达到热平衡后根据普朗克辐射定律发射电磁波^[7]。光热探测器的吸收层常被设计为接近黑体特性的材料,使其在更广的波长范围内具备超高吸收率,从而提高测量灵敏度和精度。

鉴于本系统需测量 $0.4\mu\text{m}$ 至 $2.4\mu\text{m}$ 宽光谱范围、多通道输出及高重复频率激光,光热探测器凭借其宽光谱无选择性响应、高吸收效率及稳定性,能够满足设计要求。

1.2 氧化铜吸收层性能分析

1.2.1 氧化铜吸收性能分析

对于氧化铜作为探测器吸收层而言,通过其微米级粗糙结构实现多次散射和光捕获、带隙与光子能量匹配促进光子跃迁吸收^[8],以及在高光强下激发表面等离子体共振(SPR)增强吸收,共同构成其高吸收率的物理机制^[9],在可见光至红外波段下吸收率在90%以上。以氧化铜黑体为实验对象,采用1064 nm Nd:YAG激光器、532nm可见光绿光激光器和10600 nm CO₂激光器进行激光吸收实验,采用菲涅尔方程计算吸收率,根据实验数据进行拟合,模拟得到在不同激光波段下的吸收率曲线如图1所示。

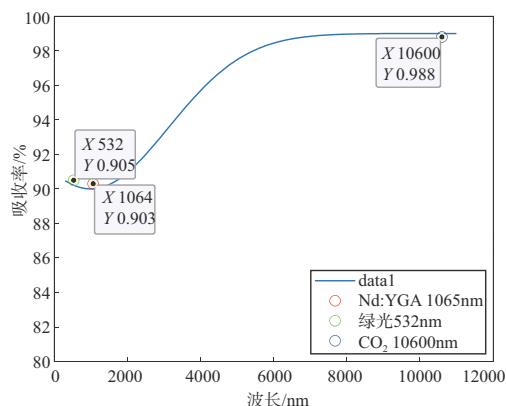


图1 氧化铜黑体在不同激光波段的吸收率曲线图

氧化铜黑体的吸收率除了与波长影响有关外,激光的脉冲宽度和脉冲频率也影响材料的能量沉积和热积累过程,从而进一步调节氧化铜黑体的吸收性能。

氧化铜的激光吸收特性随着脉冲宽度和脉冲频率的变化而不同^[10]。在飞秒到皮秒(fs-ps)范围内,由于极高的瞬时光强,非线性吸收增强,涉及局部能量密级变化,且脉冲频率较低(Hz-kHz),

使得每次脉冲间的热量能够充分扩散,吸收较为稳定。进入纳秒(ns)范围时,主要表现为线性吸收,局部温升显著,并且由于脉冲频率提升至MHz-GHz级别,热积累效应变得明显,表面温升会影响吸收率。而在微秒到毫秒(μm -mm)范围及连续波(CW)条件下,热扩散效应更加显著,吸收较为均匀,持续加热的情况下,吸收率逐渐接近材料本身的极限。因此,不同脉冲条件下,氧化铜的吸收机制由非线性增强逐渐转变为热积累主导,最终趋于材料吸收能力的极限。

以氧化铜黑体材料为实验对象,采用1064nmNd:YAG激光器以文献^[1]的实验方案进行实验,模拟在不同脉冲宽度和脉冲频率下对激光的吸收率变化曲线,如图2所示。

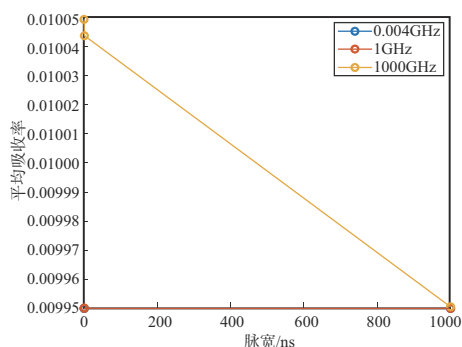


图2 不同脉冲宽度和频率下吸收率变化曲线图

随脉冲宽度的增加,吸收率逐渐提升;随脉冲频率增加,吸收率趋于饱和,高频激光导致热积累效应,使得氧化铜黑体对高频脉冲激光具有更好的响应。在不同脉冲宽度和频率下的吸收响应如图3所示。表明氧化铜黑体在甚高重频激光下具有平滑、连续的吸收响应,无明显饱和或退化。

并对不同脉冲频率的响应时间定量变化做出分析。响应时间随脉冲频率的定量变化可通过热扩散和材料特性分析。建立模型,表示为

$$\tau_0 = \frac{\rho c d^2}{k}, \delta(f) = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (1)$$

$$\tau(f) = \frac{d^2}{\alpha} \cdot \frac{1}{1 + (2\pi f \tau_0)^2} + \frac{1}{2\pi f} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f d^2}} \quad (2)$$

式中, τ_0 为低频响应时间; $\delta(f)$ 为热扩散深度; α 为热扩散率; τ 为响应时间; d 为吸收层厚度 ($d \gg \delta(f)$); $\rho = 6.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $c = 540 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $k = \text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

对10Hz~100KHz的脉冲频率响应时间进行分析,系统利用光热效应对高重频脉冲激光的平均功率进行测量;当平均功率发生变化时,探测的热响应时间在1s以下。如图4所示。

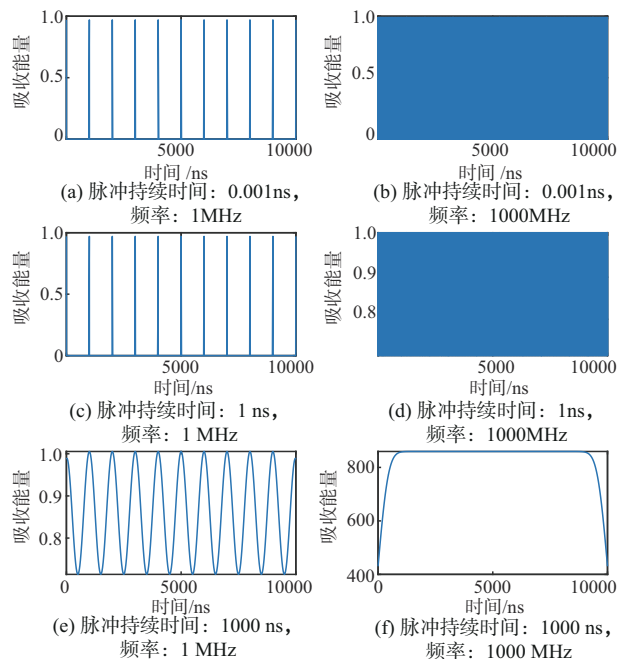


图3 不同脉冲宽度和频率的吸收响应图

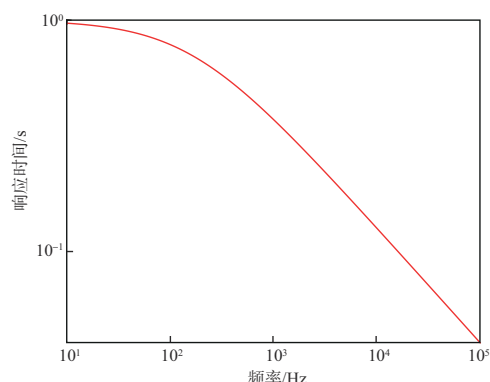


图4 10Hz~100KHz响应时间图

1.2.2 氧化铜加热特性仿真模拟

为探究热传导路径的温度辐射特性及优化热链材料性能,基于有限元数值模拟方法构建了氧化铜吸热腔体的三维仿真模型。该模型热沉采用铝合金,热端绝缘层采用氮化硅陶瓷,冷端绝缘层选用氮化硼陶瓷,PN结温差电臂组(P型碲化铋与N型硒化铋)和铂镍复合电极。模型采用高阶四面体单元进行离散化处理,共计生成152300个网格节点与835420个三维计算单元,其精细化网格剖分结果如图5所示。

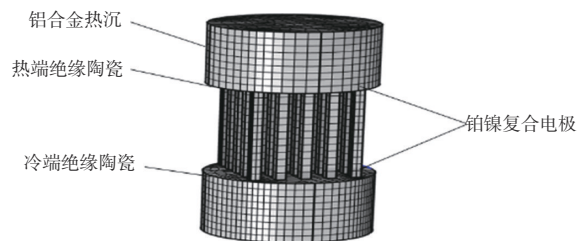


图5 网格结构图

为了氧化铜吸收层加热效果影响, 选择了恒定功率 (2000w) 作为模拟加热源加热时间为 0.3s。整体温度分布及冷热端的最高温度图如图 6 所示。

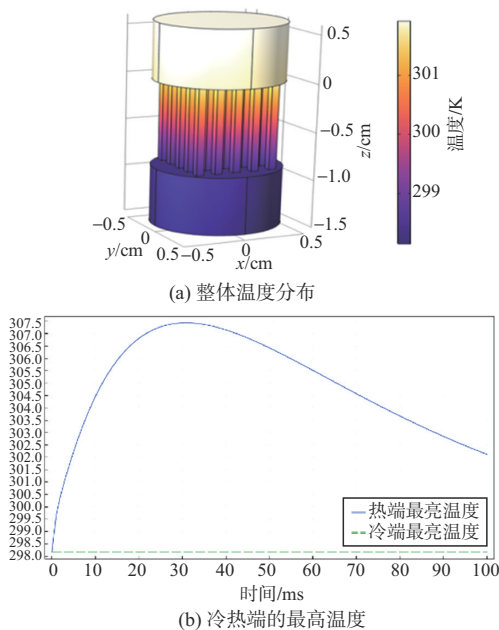


图 6 2000W 恒定功率对热温差的影响

模拟结果表明通过采用大容量热沉的方式, 可保证测量周期内冷端稳定恒定, 因此基本可认为对系统热电效应测量结果无显著影响。

因此, 在 $0.4\mu\text{m}$ 至 $2.4\mu\text{m}$ 的宽波长连续谱激光范围 (可见光和红外) 内利用甚高重频激光照射时, 选择光电探测器由于具有波段范围的限制不能满足设计要求, 需要利用多个探测器组合而增加了系统结构的复杂性, 而光热探测器其自身的黑体吸收度高, 且波长范围覆盖设计要求所需并且脉冲宽度和脉冲频率对吸收度影响符合设计需求, 响应时间约秒级从而选择以氧化铜作为吸收层光热探测器为系统探测器。

2 系统分析

连续谱激光能量测量系统是一种对甚高重频激光功率测量设备, 连续谱激光主要应用于光电对抗系统中, 在外场实验时, 主要测量感兴趣区域内的平均光功率密度; 此时光斑直径大于米级, 远超测量设备的光学窗口尺寸, 因此可近似认定光学窗口所接收的光斑功率密度基本相同。系统由光热探测器模块、数据采集模块、处理模块和人机交互系统组成, 整体系统组成如图 7 所示。光热探测器模块将激光能量转化为电压信号进行采集; 采集模块是以 AD 芯片为核心组成的电路, 完成模拟信号到数字信号之间的转换; 处

理模块是以国产单片机为核心组成的电路, 负责执行复杂的控制算法, 还承担着对激光能量值进行精确计算和获取的重要任务; 人机交互软件则是操作者与设备之间沟通的桥梁, 采用了 RS422 通信协议, 对设备进行操作, 同时实时获取设备的测量数据和状态信息。

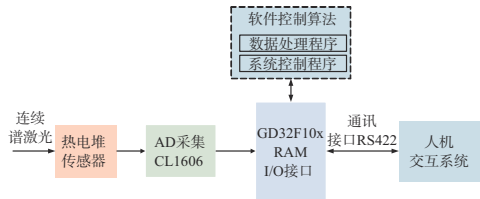


图 7 连续谱激光能量测量系统组成图

2.1 光热探测器模块

为确保了系统能在宽光谱的波段内对能量具有较强的吸收, 保证激光能量计在高损伤阈值的前提下有平坦的吸收曲线, 保证系统测量的准确性^[12,13]。光热探测器模块采用以氧化铜作为吸收层的热电堆作为传感器, 当激光器发出的激光束垂直入射到热电堆吸收层表面时, 吸收层将入射辐射转化成热量吸收, 同时由于传热体结构为圆盘型, 该热量从吸收区表面以热辐射形式辐射进入传热体。由传热体沿横向导热, 热电堆中心底部温度热端相比于边缘位置冷端温度较高, 这样导致出现温差^[14]。由于塞贝克效应, 温差引起底部串联的热电偶形成输出电压, 输出电压与连续谱激光发出的激光功率呈现一种正比例线性关系。热电堆探测器的结构示意图如图 8 所示。

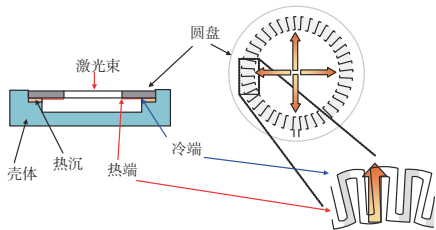


图 8 热电堆探测器结构图

2.2 数据采集模块

数据采集模块包括信号的放大滤波、模数转换和数据传输 3 个部分。

2.2.1 信号放大滤波

由于热电堆探测器输出的电压信号范围较小 ($0\sim1.5\text{V}$), 直接输入到数据采集系统会导致信号分辨率不足或信噪比偏低, 影响测量精度。因此, 需要对探测器的输出信号进行信号调理, 以增强信号质量和测量准确性^[15]。

采用 LTC2057 低噪声精密运算放大器对热电堆探测器输出的 $0\sim1.5\text{V}$ 微弱信号进行一级放大,

凭借其低噪声、高输入阻抗和低偏置电流特性,有效提升信号强度且不引入额外噪声^[16, 17]。随后,利用RC低通滤波器抑制高频噪声,保留有用低频信号。经滤波后,信号再经二级放大,线性放大至0~4.5V,充分匹配ADC输入范围,有效提高数据采集的分辨率和精度,电路图如图9所示。

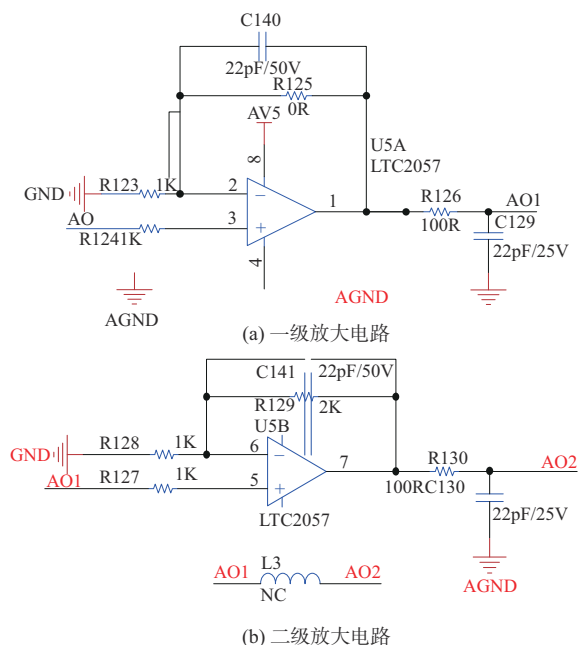


图9 信号放大滤波电路图

采用低噪声精密运放和RC滤波电路,不仅能有效放大信号,还能抑制环境噪声和电磁干扰,提高系统的稳定性和可靠性,确保了探测器输出信号的真实性和有效性,避免了由噪声引起的数据误差。

2.2.2 数据采集

考虑到A/D转换器的采样余量以及探测器系统数据处理的余量^[18],采用了核心互联公司出品的8通道高精度16位分辨率同步采样芯片CL1606。采样芯片可以获得高精度电压信号,信号采集范围为0~5V,其内置的二阶抗混叠滤波器、跟踪保持放大器、16位电荷再分配逐次逼近型模数转换器、灵活的数字滤波器、2.5V基准电压源、基准电压缓冲以及200ksps吞吐速率采样的并行输出电路,很好的为采集功能提供稳定条件^[19]。

在完成模数转换后,为了有效应对大规模数据带来的波动与噪声干扰^[20],进一步引入加权滑动均值滤波(Weighted Moving Average, WMA)算法对数字信号进行滤波处理。相比于传统的简单滑动平均算法,加权滑动均值滤波通过对不同时间段的数据赋予递减或递增的权重,更加敏锐地捕捉数据变化趋势,同时有效抑制突发性噪声。算法式表示为

$$y[n] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} w[k] \cdot x[n-k]}{\sum_{k=0}^{N-1} w[k]} \quad (3)$$

式中, $y[n]$ 为滤波后的输出信号; $x[n]$ 为输入信号的第 n 个数据点; $w[k]$ 为滑动窗口内的第 k 个权重, $k=0, 1, \dots, N-1$; N 为滑动窗口大小。权重根据距离当前采集点的远近设定,距离越近权重越大,越远权重越小,从而提高滤波对当前数据点的响应能力。

2.2.3 数据传输

系统采用国产GD32F103xxx主控芯片,基于ARM架构实现数据的并行采集、缓存与时序控制^[21]。主控芯片为CL1606采集模块提供10MHz时钟信号,并以20kHz速率通过DMA将16路数字信号高效传输至指定RAM。DMA自动更新传输计数器并动态监控数据传输状态,确保数据集同步反映激光能量信号^[22]。最终,数据经RS422串口传输至人机交互系统。系统数据传输如图10所示。

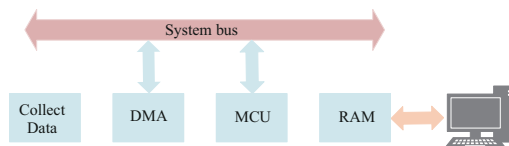


图10 系统数据传输框图

2.3 人机交互模块

人机交互软件的设计编写是基于C++语言编写的,开发工具使用的是QT^[23]。相较于Visual Studio下使用C#编写的软件,C++具有跨平台支持、性能、低级控制以及库支持等方面的优势^[22]。软件利用串口RS422与下位机进行通信,界面主要包括能量显示模块、通信模块和数据存储模块如图11所示。

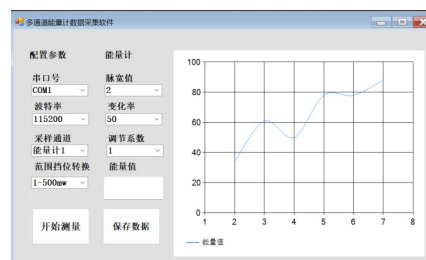
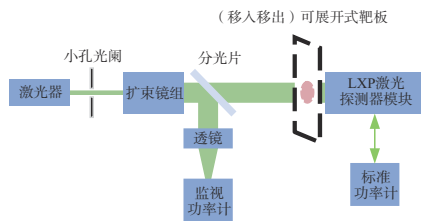


图11 上位机控制界面

3 实验结果分析

3.1 数据标定

设计完成的激光能量测量系统用激光能量计标准装置进行标定。激光器输出经扩束镜准直后,由分光棱分束,反射光导入监视功率计,透射光入射至标准功率计计算分光比^[24]。系统标定光路如图12所示。



(a) 系统标定组成图



(b) 系统标定实物图

图 12 系统标定图

用 2936-C 标准功率计测量入射光总功率 P_{in} (移开分光镜直接测)，再测量反射功率 P_R 和透射功率 P_T ，重复测量 3 次取平均，降低激光功率波动影响，计算分光比，表示为

$$R = \frac{P_R}{P_{in}}, T = \frac{P_T}{P_{in}}, S = \frac{R}{T} \quad (4)$$

表 1 系统重复性测试及误差分析

标准值/mw	测量值/mw	误差/%	标准值/mw	测量值/mw	误差/%
100.4	101.5	1.09	400.5	403.5	0.75
101.2	100.4	0.79	401.4	398.7	0.67
100.8	102.3	1.49	402.8	399.3	0.86
99.8	101.2	1.40	401.2	405.3	1.02
99.4	100.5	1.11	399.6	404.2	1.15
200.6	202.2	0.80	600.8	596.4	0.73
201.4	200.2	0.60	602.4	598.3	0.68
200.5	202.3	0.90	600.3	606.8	1.08
199.8	202.5	1.35	602.8	597.8	0.83
199.4	201.4	1.00	600.3	605.7	0.90

表 2 系统测量结果及误差分析

标准值/mw	测量值/mw	误差/%	标准值/mw	测量值/mw	误差/%
10.2	10.1	0.98	300.4	298.4	0.65
20.6	20.3	1.46	350.2	354.2	1.14
40.3	39.8	1.24	400.3	403.8	0.87
80.6	81.2	0.74	450.5	454.8	0.95
100.7	101.8	1.09	500.8	504.4	0.72
150.4	148.6	1.20	550.6	558.6	1.45
200.2	202.8	1.30	600.4	596.6	0.63
250.6	252.9	0.92	650.8	657.8	1.08
300.9	298.6	0.76	700.5	706.3	0.83

根据下述实验测量结果，表明激光器标定后功率标准数据和系统实验数据均满足误差在 $\pm 1.5\%$ 以内，测量数据准确度高，重复性好，可满足需求。

4 结 论

本研究表明，针对宽波段连续激光功率测量的

式中， R 为反射率； T 为透射率； S 为分光比。

在测试标定光路中分别用 671nm 和 1064nm 激光器标定设计的连续谱激光能量测量系统，并验证其重复性和线性度。实验时，输入固定的激光功率，对其每个点进行 10 次测量并记录数据，通过实验数据利用最小二乘法拟合出标定系数，计算出两者之间的线性关系，完成实验数据标定。数学公式表示为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n D_{Si} \cdot D_{Ci}}{\sum_{i=1}^n D_{Ci}^2} D_c = D_s \cdot S \quad (5)$$

式中， K 为最小二乘法拟合出的标定系数； D_c 连续谱激光能量测量系统通过光路得到的能量乘分光比； D_s 为标准能量计测量得到光能量； i 为测量次数。

3.2 实验结果

在系统标定结束后，继续进行实验测量，以验证系统的重复性和准确性。以 671nm 和 1064nm 激光为输入对象，测量重复性结果如表 1 所示，准确性结果如表 2 所示，包括标定设备标准能量计测量值、系统标定后测量值以及误差分析。

技术难题，所设计的基于氧化铜热电堆探测器的激光能量采集系统具有显著的技术优势与实用价值。通过采用氧化铜作为热电堆吸收层材料，系统在 $0.4 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 宽光谱范围内实现了优于传统探测器的光谱响应特性，其特有的热传导性能有效平衡了宽波段吸收与热噪声抑制的矛盾。结合自主开发的加

机滑动均值滤波算法,成功解决了高重复频率激光动态测量的精度与实时性平衡问题。实验验证表明,在671nm和1064nm双波段校准模式下,系统对复合光谱的测量误差稳定控制在 $\pm 1.5\%$ 以内,后续研究将着重于扩展紫外-红外波段检测边界,并探索基于深度学习的自适应滤波算法以提升系统在超连续谱激光测量中的适应性。

参考文献:

- [1] 胥杰,赵尚弘,侯睿,等.强激光对典型激光制导光电探测器的干扰效应研究[J].光学技术,2008,34(S1):80—82.
Xu Jie, Zhao Shanghong, Hou Rui, et al. Researches on high power laser jamming effect on typical laser guiding photoelectric detectors[J]. Optical Technique, 2008, 34(S1):80—82.
- [2] 王世勇,付有余,郭劲.远场光电探测器系统受激光干扰与损伤效果估计[J].光学技术,2002,(01):28—30+35.
Wang Shiyong, Fu youyu, Guo Jin. Evaluation of high energy laser effecting on remote distance photoelectron sensor system[J]. Optical Technique, 2002, (01):28—30+35.
- [3] 王景.光电对抗技术的应用分析[J].科学技术创新,2020,(15):31—32.
Wang Jing. Analysis of the application of optoelectronic countermeasure technology[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020, (15):31—32.
- [4] 何九如.随机光纤激光产生超连续谱的研究[D].长沙:国防科技大学,2022:25—60.
He Jiuru. Study on supercontinuum generated by random fiber laser[D]. Chang Sha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2022:25—60.
- [5] Kruplevich E, Nasennik L, Chernikov V, et al. Setup for cw laser average power and pulse laser energy measurements and laser average power and laser pulse energy detectors calibration[J]. Lasers for Measurements and Information Transfer, 2005, 6251:2—5.
- [6] 魏继锋,胡晓阳,张凯,等.高能激光能量直接测量技术及其发展趋势[J].红外与激光工程,2017,46(07):41—49.
Wei Jifeng, Hu Xiaoyang, Zhang Kai, et al. Technologies and development trends of directly measuring high energy laser energy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(07):41—49.
- [7] 郑佳琪,丛振华,刘兆军,等.高重复频率超短激光脉冲产生及频率变换技术发展趋势[J].中国激光,2021,48(12):126—146.
Zheng Jiaqi, Cong Zhenhua, Liu Zhaojun, et al. Recent trend of high repetition rate ultrashort laser pulse generation and frequency conversion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12):126—146.
- [8] 刘睿丰,陈猛,王迎新,等.柔性光热电探测器研究进展[J].中国激光,2023,50(23):9—30.
Liu Ruifeng, Chen Meng, Wang Yingxin, et al. Research Progress of Flexible Photo thermo electric Detectors[J], Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(23):9—30.
- [9] Zhu Zh, Wang Y Zh, Yi Y C. Novel direct-detection scheme for measuring energy distribution of laser spots in outfield[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(11):49—53.
- [10] Lourdes L Arjona, Jose I Garcia Peiro, Marta Haro, et al. Gold nanorods - Copper (I) oxide core-shell nanoparticles for full-visible to near-infrared responsive photodetectors[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 10(16):179030—179030.
- [11] Albani W Alrowaily, B M Alotaibi, A Atta, et al. Structural and linear/nonlinear optical characteristics of flexible polypyrrole/CuO polymeric composite films[J]. International Journal of Modern Physics, 2024, 39(15):46—49.
- [12] Salah M Abdul Aziz, Uday M Nayef, Mohammed Rasheed. Synthesis of copper oxide nanoparticles via laser ablation in liquid for enhancing spectral responsivity[J]. Plasmonics, 2024, 20:2869—2879.
- [13] 戴殊韬,江涛,吴丽霞,等.单脉冲时间精确可控的单纵模Nd:YAG激光器[J].物理学报,2019,68(13):128—132.
Dai Shutao, Jiang Tao, Wu Lixia, et al. Single-axial-mode Nd:YAG laser with precisely controllable laser pulse output time[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(13):128—132.
- [14] 刘志鹏,刘智,成步文.高速光电探测器的研究进展(特邀)[J].光学学报,2024,44(15):119—130.
Liu Zhipeng, Liu Zhi, Cheng Buwen. Research advances of high speed photodetectors (invited) [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(15):119—130.
- [15] 夏燕,薛晨阳,欧文,等.基于黑硅为吸收层的热电堆红外探测器[J].仪表技术与传感器,2012,(03):11—14.
Xia Yan, Xue Chenyang, Ou Wen, et al. Thermopile infrared detector based on black silicon as absorption[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012, (03):11—14.
- [16] Ma T Jun, Xue N, Abdul Muhammad, et al. Recent progress in photodetectors: from materials to structures and applications[J]. Micromachines, 2024, 15(10):1249—1249.
- [17] Kotov M A., Kozlov P V, Gerasimov G Ya, et al. Thermo-electric detector application for measuring the ignition delay time in a shock heated combustible mixture[J]. Acta Astronautica, 2023, 204:787—793.
- [18] 朱嵘涛,罗明璋,徐爱钧.基于Proteus的高性能共源放大电路的设计[J].现代电子技术,2017,40(08):134—136+140.
Zhu Rongtao, Luo Mingzhang, Xu Aijun. Design of high-performance common-source amplifying circuit based on Proteus[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(08):134—136+140.
- [19] Wang Wenzhao. Design of low-noise low-power ECG amplifier circuit with high integration level[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2649(1):12—62.
- [20] 胡欣,王生辉,常姪姝,等.基于STM32的塔机数据采集和监控系统设计[J].仪表技术与传感器,2024,(04):53—58.
Hu Xin, Wang Shenghui, Chang Yashu, et al. Design of data acquisition and monitoring system for tower crane based on STM32[J]. Instrument Technique and Sensor, 2024, (04):53—58.
- [21] Li Zh, Chen D H. Design and Implementation of data acquisition system based on fpga and high-speed AD[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556:1515—1519.
- [22] P De Lurgio, Z Djurcic, G Drake, et al. A prototype of wireless power and data acquisition system for large detectors[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2015, 785:99—104.
- [23] 李华君.一种基于Qt的应用软件开发与集成方法[J].雷达与对抗,2022,42(04):46—52+57.
Li Huajun. A Qt-based application software development and integration method[J]. Radar & ECM, 2022, 42 (04): 46—52+57.
- [24] Mo T P, Su Y, Tang Y. Upper computer software design for fretting signal acquisition system based on Qt[C]// Xi AN: Third International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications, ISCEIC, 2022: 124620T-124620T-8.