

短曝光式激光功率计的响应线性度

于涛 刘钊辉 孙青 赵利强

Response linearity of a short-exposure laser power meter

YU Tao, LIU Zhaohui, SUN Qing, ZHAO Liqiang

引用本文:

于涛, 刘钊辉, 孙青, 等. 短曝光式激光功率计的响应线性度[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1110–1118. DOI: 10.5768/JAO202546.0507001

YU Tao, LIU Zhaohui, SUN Qing, et al. Response linearity of a short-exposure laser power meter[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1110–1118. DOI: 10.5768/JAO202546.0507001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0507001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光压原理的大功率激光功率测量

High-power laser power measurement based on principle of light pressure

应用光学. 2022, 43(4): 798–802 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0407002>

基于量热法的高功率激光功率测试技术

Power measurement technology of high power laser based on calorimetric method

应用光学. 2024, 45(3): 522–528 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310005>

基于共掺杂调控 C_{32} 多极矩的二阶非线性光学响应

Second-order nonlinear optical response based on codoped C_{32} multipole moments modulation

应用光学. 2023, 44(4): 726–735 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401004>

提高ECDL扫频线性度的高效迭代算法

Efficient iterative algorithm for improving frequency sweep linearity of external cavity lasers

应用光学. 2024, 45(3): 575–582 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310012>

编码曝光相机系统设计

System design of camera for coded exposure

应用光学. 2020, 41(1): 1–9 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0101001>

低温辐射计紫外探测器光谱响应度测试技术研究

Spectral responsivity measurement technology for UV detector based on cryogenic radiometer

应用光学. 2022, 43(2): 311–316 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0204001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1110-09

引用格式: 于涛, 刘钊辉, 孙青, 等. 短曝光式激光功率计的响应线性度[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1110-1118.

YU Tao, LIU Zhaohui, SUN Qing, et al. Response linearity of a short-exposure laser power meter[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1110-1118.



在线阅读

短曝光式激光功率计的响应线性度

于涛¹, 刘钊辉^{1,2}, 孙青², 赵利强¹

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 中国计量科学研究院 光学与激光计量科学研究所, 北京 100029)

摘要: 短曝光式激光功率计具有测量效率高和成本低等优点, 在高功率激光测量方面拥有广阔的应用前景。设计了一款短曝光式激光功率计, 对探测器在不同功率激光、不同激光照射时间下的温度响应特性进行了实验研究。实验结果表明, 出光结束 10 s 时的温升数据能更好地表征激光功率; 出光时长会影响探测器响应的线性度, 出光时间不超过 1 s 时, 探测器响应非线性偏差小于 3%, 出光时间不超过 2 s 时, 探测器响应非线性偏差不得超过 5.5%。建立了探测器的三维有限元模型, 分别对有散热和无散热的情况进行了仿真。仿真结果表明, 散热对探测器响应非线性度的影响较小, 短时间内响应非线性主要由传热过程造成, 长时间时影响探测器响应线性度的主要因素为测量信噪比。

关键词: 激光测量; 短曝光; 响应线性度; 非线性偏差; 散热

中图分类号: TN249; TB96

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0507001

Response linearity of a short-exposure laser power meter

YU Tao¹, LIU Zhaohui^{1,2}, SUN Qing², ZHAO Liqiang¹

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Division of Optical Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Short-exposure laser power meters have the advantages of high measurement efficiency and low cost, and have a broad application prospect in high-power laser measurement. A short-exposure laser power meter was designed, and the temperature response characteristics of the detector under different power lasers and different laser irradiation times were experimentally studied. The experimental results show that the temperature rise data at the end of the laser for 10 s can better characterize the laser power. The nonlinear deviation of the detector response is less than 3% when the duration of the detector is less than 1 s, and the nonlinear deviation of the detector response is not more than 5.5% when the duration of the laser is less than 2 s. A three-dimensional finite element model of the detector was developed. Simulations were carried out for scenarios with heat dissipation and without heat dissipation, respectively. The results show that the influence of heat dissipation on the nonlinearity of the detector response is small, the nonlinearity of the response in a short time is mainly caused by the heat transfer process, and the main factor affecting the linearity of the detector response in a long time is the measurement of signal-to-noise ratio.

Key words: laser measurement; short exposure; linearity of response; nonlinear deviation; heat dissipation

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2025-02-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0715603); 市场监管总局质量技术基础能力建设专项 (ANL2005)

第一作者: 于涛, E-mail: 2007500053@buct.edu.cn

通信作者: 孙青, E-mail: sunqing@nim.ac.cn

引言

近年来激光在各个领域的应用越来越广泛, 激光器的输出功率不断提高^[1]。激光功率是评价激光质量和激光器研制水平的重要参数, 其准确测量对于科学研究和工业生产具有重要意义^[2-4]。常见的高功率激光功率计主要分为热电堆型、流水型和光压型等几类^[5]。热电堆型激光功率计基于塞贝克效应进行工作, 该类型功率计光谱响应平坦、可测功率范围大, 但其对环境温度敏感、响应速度慢^[6]; 流水型激光功率计利用水作为冷却和传感介质, 通过测量吸收激光前后的水温变化测算激光功率, 其功率测量上限较高, 但通常设备体积庞大, 且对水温的稳定性要求较高^[7]; 光压型激光功率计利用光辐射压力测量激光功率, 其响应速度快、测量上限高, 但环境适用性较差且价格昂贵^[8-10]。以上几种类型的激光功率计各有优缺点, 分别适用于不同的应用场合。在工业加工现场, 以较低的成本实现激光功率的快速、准确测量具有非常广泛且迫切的需求。

短曝光式功率计通过对激光能量和出光时长的测量得到被测激光功率大小^[11-12], 此类型功率计分为两类, 其中一类不具备出光时长测量功能, 需要手动计时或者通过激光器设置固定的出光时间, 为了减小出光时间造成的误差, 一般需要固定出光时间为 10 s 或 20 s, 这导致激光能量较大, 探测器冷却时间较长, 重复测量效率低^[13]。同时为了避免探测器因能量过高而损坏, 通常将探测器做成体吸收型, 采用反射锥将激光反射到四周吸收体上, 或将吸收体设计成锥形或球形, 使吸收体均匀吸收激光, 但这会使探测器结构更加复杂^[14-18]。另一类集成了光电探测器, 具备出光时长测量功能, 因此无需固定出光时间, 出光时间最短只需要 100 ms, 由于出光时间较短, 探测器温升较小, 冷却时间大幅缩短, 测量效率大大提高^[19]。且因能量较低, 探测器可设计为面吸收型, 结构更加简单。这类短曝光式功率计具有体积小、成本低、测量效率高优点, 拥有广阔的应用前景。但探测器的散热和传热都有可能影响功率计响应的线性程度, 因此需要研究散热对探测器响应的影响并确定合适的激光照射时长。此外, 探测器达到热平衡状态的过程耗时较长, 有必要研究热平衡达成之前哪一时刻温度值

能够更好地表征激光功率。

本文设计了一种基于热敏电阻测温的面吸收型短曝光式激光功率探测器。为了研究短曝光式功率计的响应特性, 搭建了测试试验系统, 对探测器在不同功率激光、不同激光照射时间下的温度响应特性进行了实验研究。通过分析其温度响应数据, 确定了合适的激光照射时长以及热平衡之前哪一时刻温度数据更适合表征激光功率。利用有限元软件对激光照射探测器进行了模拟仿真, 以研究影响探测器响应线性程度的因素。通过实验和仿真发现, 散热对系统响应线性度的影响较小, 较短时间内非线性主要由传热本身造成, 在出光结束后较长时间, 影响线性程度的主要因素是测量信噪比, 此时的温升较小, 测量信噪比较低, 环境噪声和设备性能会对实验结果产生更大影响。

1 测量原理与装置

1.1 测量原理

激光入射到吸收体后被吸收, 光能转化为热能, 吸收体表面温度逐渐升高, 随后热量由表及里, 由高温向低温扩散, 入射激光能量 E 与温升 ΔT 之间存在以下线性关系:

$$E = cm\Delta T \quad (1)$$

式中: c 为比热容; m 为吸收体质量, 二者的乘积为常数。由激光能量和激光出光时间 Δt 可计算得到激光功率 P :

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{cm\Delta T}{\Delta t} \quad (2)$$

可见, 激光功率正比于吸收体温升与激光出光时间的比值, 因此只要测得激光的出光时间与温升就可计算出激光功率。

1.2 实验装置

实验所用激光器为 IPG 公司的 YLS-6000-S2T 光纤激光器, 中心波长为 1 070 nm, 光斑直径为 30 mm, 功率短期稳定性优于 0.2%, 激光出光上升时间不超过 27 μ s, 下降时间不超过 17 μ s, 可保证出光时间控制的准确性。

探测器主体采用强度高、导热性能和抗腐蚀性能良好的铝合金制作, 整体为 70 mm×80 mm×90 mm 的长方体, 底座部分和长方体中部有开孔, 底座部分开孔用于放置热电阻, 中部开孔可放置

光电探测器,用于测量激光出光时间。长方体中有直径 60 mm 的圆柱形吸收腔,吸收腔深度为 60 mm,吸收体采用激光吸收率和损伤阈值较高的石墨片制作,且其比热容受温度影响较小。石墨片直径为 56 mm,厚度约为 2 mm,置于吸收腔底部,与铝合金之间采用高性能导热胶连接。探测器实物如图 1 所示。

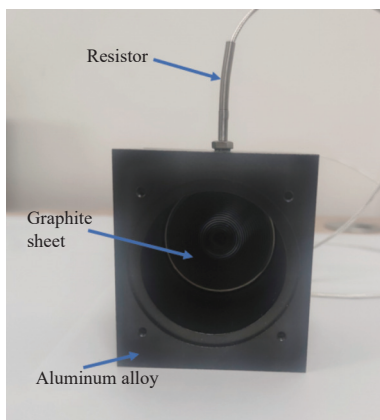


图 1 探测器实物图

Fig. 1 Physical image of detector

采用 Pt100 铂电阻作为测温元件,其具有稳定性好、测温范围广、响应速度快和价格低廉等优点。铂电阻测温位置位于距探测器中心点 14.5 mm 处。使用高精度万用表(Agilent 34420A)采集铂电阻阻值,电阻值经过换算得到温度。数据采集与分析使用 LabVIEW 软件进行,采用 GPIB 协议与万用表进行通信,软件主要包括通信模块、图形显示模块、采样设置模块以及当前信息显示模块。实验进行之前采用红色指示光将激光光束对准探测器吸收体中心,设定激光器出光时间,上位机软件设置采集模式、采样率与采样时间。激光功率测量系统如图 2 所示。

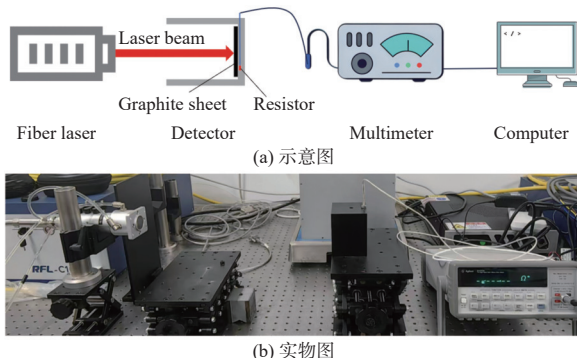
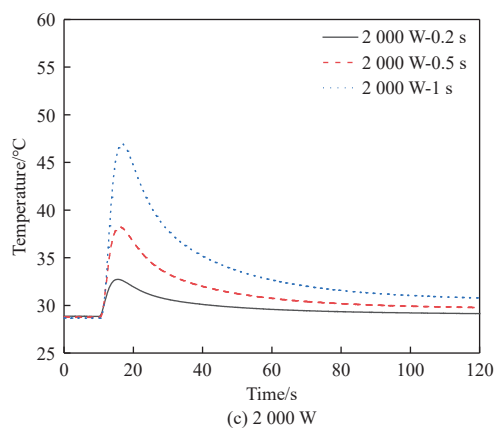
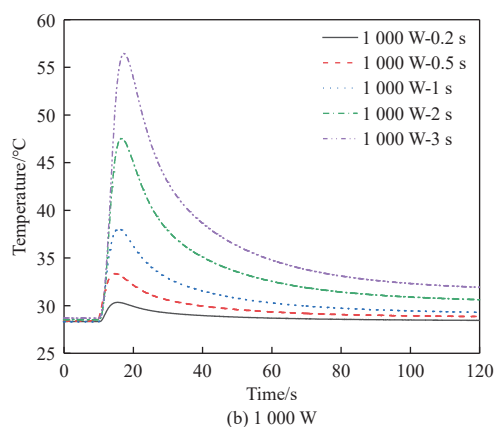
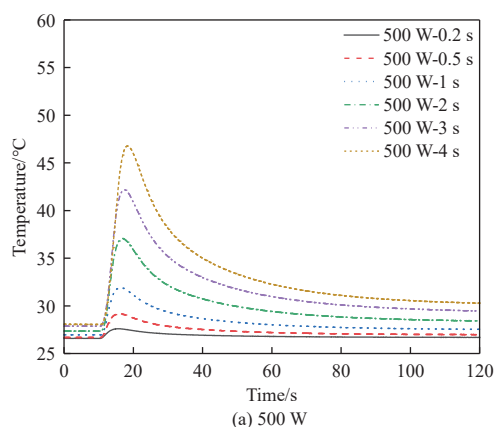


图 2 短曝光式激光功率测量系统

Fig. 2 Short-exposure laser power measurement system

2 实验结果分析

激光功率分别为 500 W、1 000 W、2 000 W、3 000 W 时,不同出光时间下吸收体的温度变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出,当激光开始出光之后,光能转化为热能,吸收体温度迅速升高。出光结束后,吸收体温度到达峰值然后缓慢下降。在激光功率相同的情况下,出光时间越长,温升和峰值温度越高;在出光时间相同的情况下,激光功率越大,温升和峰值温度越高。即吸收体温升、峰值温度与入射激光能量成正比。当激光功率为 1 000 W、出光时间为 3 s,即激光能量为 3 000 J 时,峰值温度达到最高 57 °C,温升约 30 °C。



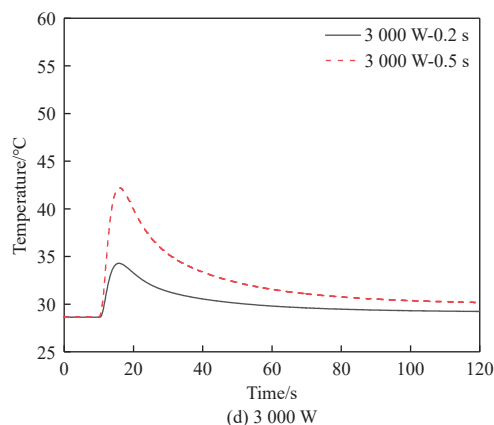


图3 不同激光功率下各出光时间探测器温度响应曲线

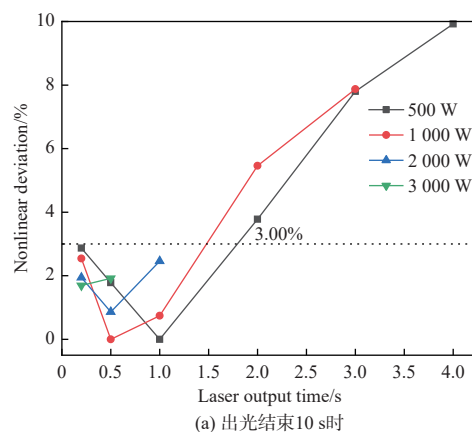
Fig. 3 Detector temperature response curves for different laser output time under different laser powers

为了确定哪个时间点数据能更好地表征入射激光的功率,在不同激光功率、不同出光时间照射条件下,取出光结束 10 s、50 s、100 s 时的温度以及峰值温度,分别与初始温度作差得出温升。依据测量原理,两数据点能量的比值应等于温升的比值,以激光功率 500 W、出光时间 1 s,即激光能量为 500 J 时的温升为基准,其他数据点能量值与 500 J 的比值乘以基准温升即为该点的理论温升,定义探测器响应非线性偏差 δ 如下:

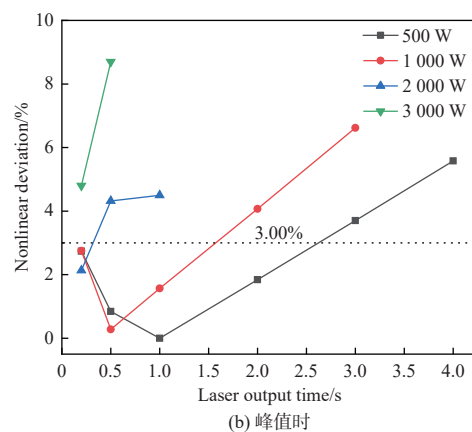
$$\delta = \left(\frac{\frac{\Delta T}{E}}{\frac{\Delta T_B}{500}} - 1 \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: ΔT 为实际温升; ΔT_B 为基准温升; E 为入射激光能量。利用式 (3) 分别计算其他数据点的非线性偏差,结果如图 4 所示。

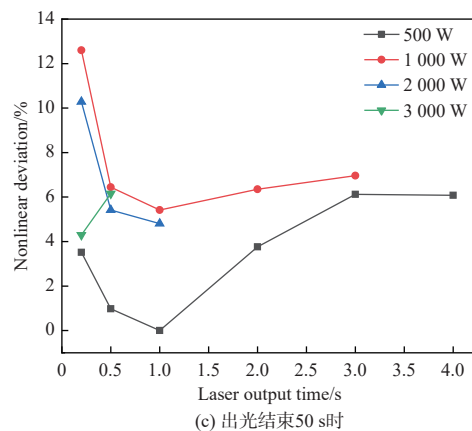
从图 4(a)、(b) 可知,无论是峰值温升还是出光结束 10 s 时温升,其探测器响应的非线性偏差均未超过 10%。而从图 4(c) 可知,出光结束 50 s 时,在出光功率 1 000 W、出光时间 0.2 s 时,响应的非线性偏差达到了 12.60%,此外在激光功率分别为 1 000 W、2 000 W 和 3 000 W 时,各数据点非线性偏差均大于 4%。根据测量原理,在时间无限长且无散热的情况下,系统达到热平衡,激光能量与温升成线性关系。而从图 4(d) 可知,出光结束 100 s 时数据非线性偏差极大,在激光功率 1 000 W、出光时间 0.2 s 时,非线性偏差可超过 40%。此外在激光功率分别为 1 000 W、2 000 W 和 3 000 W 时,随着出光时间变长,响应的非线性偏差均逐渐减小。推测造成该现象的原因可能是出光结束 100 s 时系统已经接近热平衡,当出光能量较低时,温升



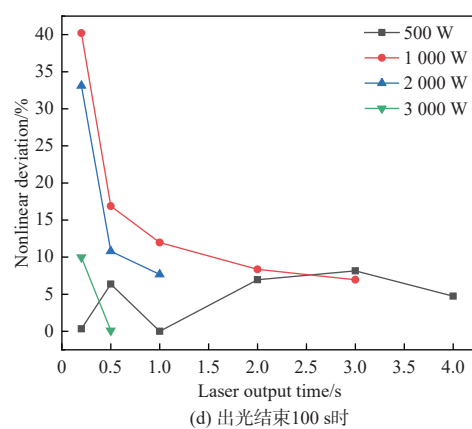
(a) 出光结束 10 s 时



(b) 峰值时



(c) 出光结束 50 s 时



(d) 出光结束 100 s 时

图4 各时间点数据的非线性偏差

Fig. 4 Nonlinear deviation of data at each time

较小,测量信噪比偏低,环境噪声及传感器性能对结果造成了较大影响;另一方面,等待时间较长,系统散热可能会导致非线性增加,引起较大偏差。因此出光结束 50 s 和 100 s 时温升数据不适合表征激光功率。

从图 4(a)、(b) 可知,无论峰值温升或者出光结束 10 s 时温升,当出光时间超过 1 s 时,其非线性偏差均有随出光时间变长而变大的趋势。出光结束 10 s 时温升非线性偏差在出光时间超过 2 s 时均大于 7%,最大值出现在激光功率 500 W、出光时间 4 s 时,为 9.92%;峰值温升的非线性偏差在出光时间超过 2 s 时均超过了 3%,最大值出现在激光功率 1 000 W、出光时间 3 s 时,为 6.62%。因此可以判断激光出光时间会影响探测器响应的线性程度,出光时间越长,非线性偏差越大,一般不宜超过 2 s。

在激光出光时间不超过 2 s 的情况下,出光结束 10 s 时的数据非线性偏差最大值为 5.46%,峰值温升的非线性偏差最大值为 8.7%。在出光时间不超过 1 s 的情况下,出光结束 10 s 时温升非线性偏差均不超过 3%,峰值温升非线性偏差最大为 8.7%,且其在高功率激光照射时有多组数据非线性偏差超过 4%。相比于峰值数据,出光结束 10 s 时数据线性程度更好,在高功率激光时也能表现出良好的线性,更适合表征激光功率。其在出光时间不超过 1 s 时,非线性偏差不超过 3%,出光时间不超过 2 s 时,非线性偏差不超过 5.5%。相比于现有激光功率计,该短曝光式功率计只需等待 10 s 即可得出测量结果,且无需固定激光出光时间,测量效率更高。

为了研究是否可以更快得到测量结果,利用式 (3) 分别计算出光结束后 2.5 s、5 s、7.5 s 与 20 s 时探测器响应的非线性偏差,结果如图 5 所示。从图 5(a)、(b)、(c) 可知,在出光结束 2.5 s、5 s 和 7.5 s 时,探测器响应的非线性偏差均较大,在出光结束 2.5 s 时,当激光功率较高 (2 000 W、3 000 W),非线性偏差均超过了 15%,出光结束 10 s 时,在出光时长不超过 1 s 的情况下,多个数据点的非线性偏差超过了 5%。出光结束 7.5 s 时,在出光时长不超过 1 s 的情况下,有多个数据非线性偏差超过了 3%,最大值为 3 000 W、激光出光 0.5 s 时,非线性偏差为 4.84%,以上 3 组数据均不如出光结束 10 s 时的数据适合表征激光功率。图 5(d) 为出光结束 20 s 时的非线性偏差数据,在出光时长不超过 1 s 时,非线性偏差最大值为 3.64%,与出光结束 10 s 时数

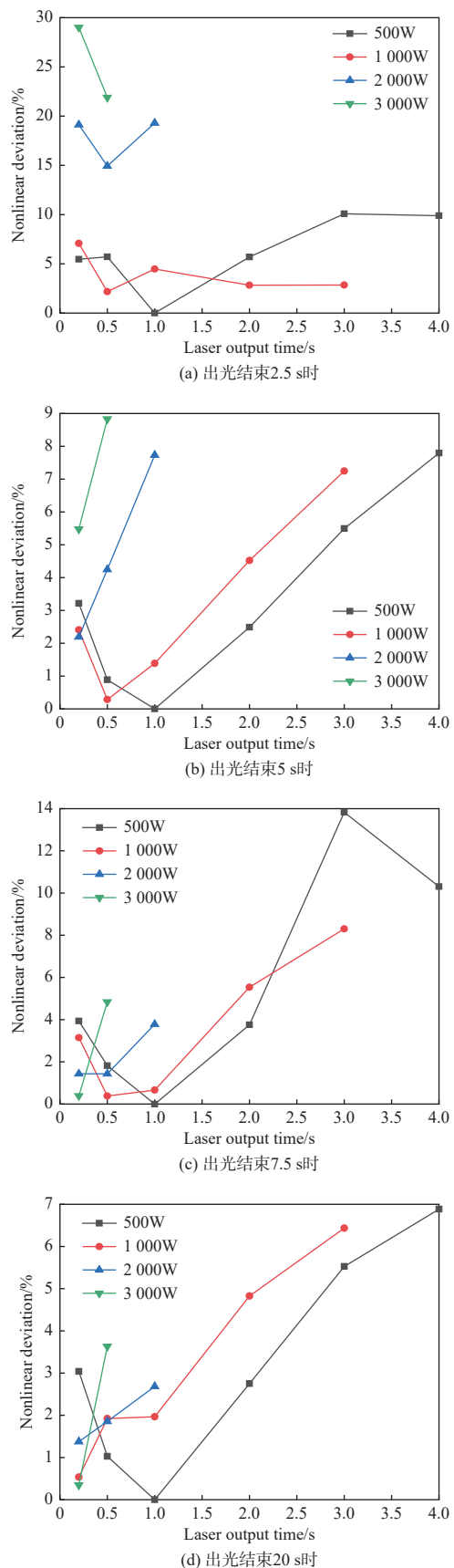


图 5 各时间点数据的非线性偏差

Fig. 5 Nonlinear deviation of data at each time

据接近,但其等待时间更长。因此出光结束 10 s 时数据更适合表征激光功率。

3 探测器激光加热仿真模拟研究

3.1 仿真模拟各时间点数据的非线性偏差

为了研究造成探测器响应非线性的原因,建立了探测器的三维模型。该模型包括铝合金主体和石墨吸收体,利用有限元软件 COMSOL Multiphysics 建立了网格模型,网格包含 50 191 个域单元、12 429 个边界单元和 1 662 个边单元。对激光光源进行仿真模拟,激光为高斯光束,光斑直径为 30 mm,光斑中心与石墨吸收体中心重合,石墨吸收体对激光的吸收率设置为 90%,环境初始温度设置为 300 K(26.85℃)。探测器网格结构如图 6 所示。激光功率 3 000 W、出光时间 0.5 s 出光结束 10 s 时探测器温度分布如图 7 所示。

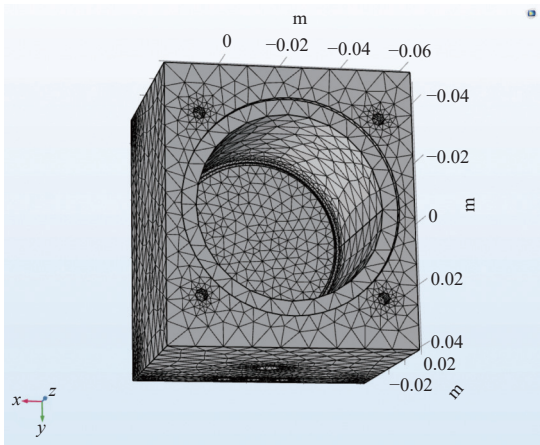


图 6 探测器网格结构
Fig. 6 Detector grid structure

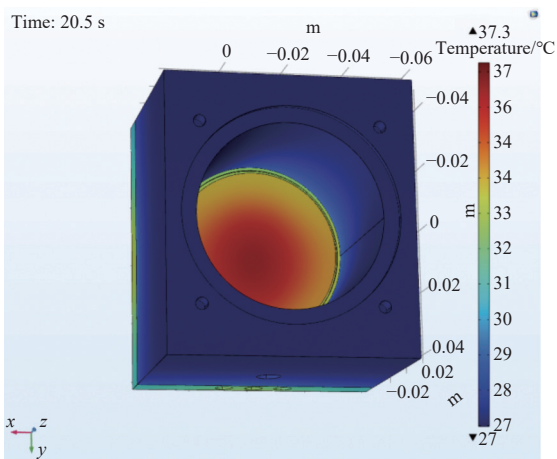
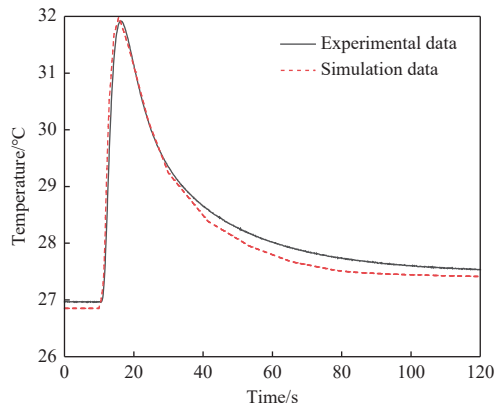
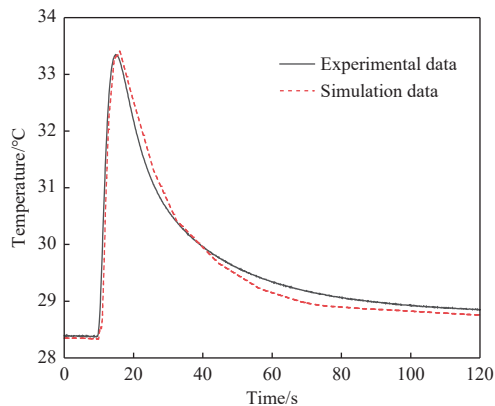


图 7 出光结束 10 s 时探测器温度分布
Fig. 7 Detector temperature distribution 10 s after the end of laser output

如图 7 所示,出光结束 10 s 时吸收体温度显著高于四周边框温度,因激光是高斯光源,激光光斑中心能量最高,温度也最高,因此吸收体中心温度也要显著高于边缘温度。激光功率 500 W、出光时间 1 s 和激光功率 1 000 W、出光时间 0.5 s 时仿真数据与实验数据对比如图 8 所示。



(a) 500 W 激光出光时间 1 s



(b) 1 000 W 激光出光时间 0.5 s

图 8 实验与仿真响应曲线对比

Fig. 8 Comparison of experimental response curve with simulation response curve

从图 8 中可以看出,在初始温度接近的情况下,实验数据与仿真数据几乎同时达到峰值,峰值大小几乎相同,经过一段时间的冷却之后,二者的冷却曲线和冷却之后的温度数值也基本相同,实验数据与仿真数据吻合情况良好,可验证仿真结果的正确性。图 9 为实验与仿真结果的非线性偏差结果对比。

从图 9(a)~(c) 可以看出,仿真数据与实验数据相比,非线性偏差相差不大,变化趋势类似。仿真数据出光结束 10 s 时数据非线性偏差最大值出现在 500 W 激光出光 4 s 时,最大为 13.30%,在出光时间不超过 1 s 时,非线性偏差不超过

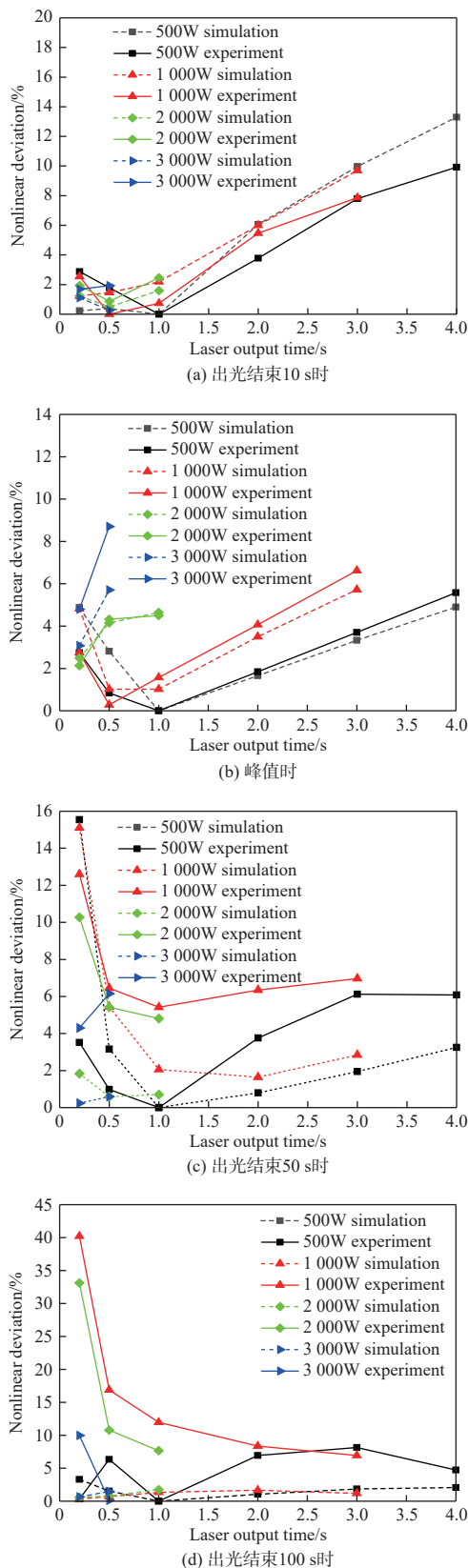


图 9 各时间点实验数据与仿真数据的非线性偏差对比

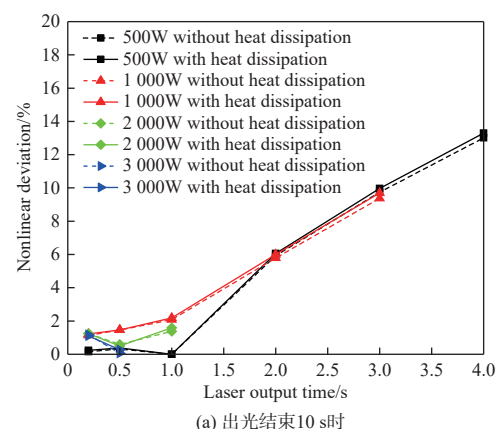
Fig. 9 Comparison of nonlinear deviation between experimental data and simulation data in each time

2.5%, 出光时间不超过 2 s 时, 非线性偏差不超过 6.5%。峰值时实验数据非线性偏差要略高于仿真数据, 但二者相差不大, 仿真数据非线性偏差最大值出现在 1 000 W 激光出光 3 s 时, 最大值为 5.73%。出光结束 50 s 时数据非线性偏差最大值出现在 1 000 W 激光出光 0.2 s 时, 最大值为 12.60%。但在出光时间不超过 1 s 时, 随着出光时间变长, 出光功率变大, 仿真数据非线性偏差逐渐减小。从图 9(d) 可以看出, 仿真数据出光结束 100 s 时数据非线性偏差较小, 皆未超过 3.5%, 最大值出现在 500 W 激光出光 0.2 s 时, 为 3.32%; 而实验数据非线性偏差普遍偏大, 最大偏差超过了 40%, 远远大于仿真数据的非线性偏差。而且随着出光时间的变长, 非线性偏差均降到了 10% 以内。由此可知, 散热并非造成出光结束 100 s 时探测器响应非线性偏差偏大的主要原因, 主要原因是出光结束 100 s 时, 探测器已经接近热平衡, 此时温升较小, 实验中受环境噪声及传感器性能限制, 此时的测量信噪比较低。

因不同模式的激光强度分布不同, 且出光结束 10 s 时吸收体尚未达到热平衡, 因此即便在激光功率相同时, 不同模式激光照射下在出光结束后 10 s 时测温点温升也会有显著不同, 这将导致无法准确测量激光功率, 所以利用该探测器探测非高斯分布的激光功率时, 每一种模式的激光均需要单独校准。

3.2 无散热条件下各时间点数据的非线性偏差

为了进一步研究散热对于探测器响应线性程度的影响, 对探测器进行了不同激光功率、不同激光照射时间的无散热情况仿真模拟, 计算出各组数据的非线性偏差, 有无散热仿真数据非线性偏差的对比如图 10 所示。



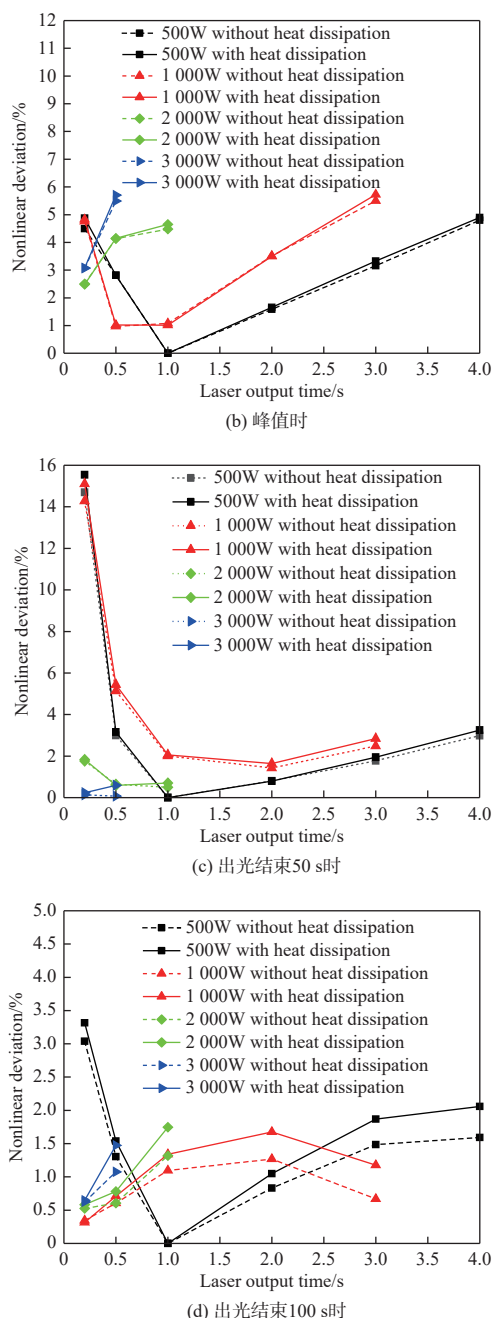


图 10 有无散热仿真数据的非线性偏差对比

Fig. 10 Comparison of nonlinear deviations between simulation data with heat dissipation and simulation data without heat dissipation

从图 10 中可以看出, 在出光结束后各个时间点的数据, 含散热情况下的仿真数据与无散热情况下的仿真数据非线性偏差变化趋势几乎相同, 各时间点数据在无散热情况下的非线性偏差均略小于有散热情况下的非线性偏差, 由此可知散热对系统线性程度有一定影响, 会增大探测器响应的非线性偏差, 但影响较小, 对探测器响应线性程度的影响最大不超过 1%。从图 10(a)~(c) 可知,

在无散热的情况下, 出光结束 10 s、50 s 和峰值时数据依然含有非线性偏差。结合图 9(a)~(c) 和图 10(a)~(c), 我们可以知道, 在出光结束后较短时间内, 非线性并非由散热造成, 主要由传热本身造成。从图 10(d) 可知, 即使出光结束后较长时间, 散热依旧对探测器响应线性程度影响较小。结合图 9(d) 和图 10(d) 可知, 在时间较长时, 散热对于系统线性程度有一定影响, 会增大非线性偏差, 但更主要的影响是环境噪声以及传感器的性能, 出光结束 100 s 时, 温升较小, 测量信噪较低, 会导致实验结果出现较大偏差。

4 结论

本文针对高功率激光功率的测量需求, 设计了一款短曝光式激光功率计, 并研究了影响其响应线性度的主要因素。为此进行了不同激光功率、不同出光时间的实验, 通过对比出光结束后不同时间的温升数据, 可得出光结束 10 s 时温升数据线性度最好, 可用来表征激光功率。实验结果表明, 出光时间不超过 1 s 时, 非线性偏差小于 3%, 出光时间不超过 2 s 时, 非线性偏差小于 5.5%。随着激光出光时间的变长, 探测器响应的非线性偏差逐渐增大。仿真结果表明, 散热会增大探测器响应的非线性偏差, 但影响较小, 短时间内系统非线性主要是由传热过程本身造成; 当时间较长时, 造成探测器响应非线性偏差较大的主要原因是测量信噪比偏低。短曝光式功率计可测功率上限高, 响应速度快, 多次测量效率高, 并且体积小、价格低廉, 在工业加工现场拥有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 金东臣, 段云锋, 孙青, 等. 150 kW 超高功率光纤激光器[J]. 中国激光, 2024, 51(14): 1416001.
JIN Dongchen, DUAN Yunfeng, SUN Qing, et al. 150 kW ultra-high power fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(14): 1416001.
- [2] 张国栋, 程光华, 张伟. 超快激光选区焊接技术研究进展[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1209-1223.
ZHANG Guodong, CHENG Guanghua, ZHANG Wei. Progress in ultrafast laser space-selective welding[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1209-1223.
- [3] ABOULKHAIR N T, SIMONELLI M, PARRY L, et al. 3D printing of aluminium alloys: additive manufacturing

- of aluminium alloys using selective laser melting[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 106: 100578.
- [4] ABBASS M K. Laser surface treatment and modification of aluminum alloy matrix composites[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2018, 5(2): 81-94.
- [5] 陈舒凡, 房丰洲. 激光功率计发展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 33-46.
- CHEN Shufan, FANG Fengzhou. Development and applications of laser power meter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 33-46.
- [6] 雷程, 武学占, 梁庭, 等. 热电堆型激光功率计设计与仿真[J]. *红外技术*, 2022, 44(2): 157-162.
- LEI Cheng, WU Xuezhao, LIANG Ting, et al. Design and simulation of thermopile laser power meter[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(2): 157-162.
- [7] WILLIAMS P A, HADLER J A, CROMER C, et al. Flowing-water optical power meter for primary-standard, multi-kilowatt laser power measurements[J]. *Metrologia*, 2018, 55(3): 427-436.
- [8] WILLIAMS P, HADLER J, MARING F, et al. Portable, high-accuracy, non-absorbing laser power measurement at kilowatt levels by means of radiation pressure[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4382-4392.
- [9] 孙青, 马冲, 林延东, 等. 基于光压原理的高功率激光测量装置[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0315002.
- SUN Qing, MA Chong, LIN Yandong, et al. High power laser measuring device based on optical pressure principle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0315002.
- [10] YANG H, SUN Z S, SUN Q, et al. Achieving 1- μ g weighing resolution of light pressure by drift analysis and compensation for precision sub-kilowatt laser power measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1004107.
- [11] 才滢. 宽波段高精度激光能量计设计[J]. *应用光学*, 2022, 43(3): 488-495.
- CAI Ying. Design of wide-band and high-precision laser energy meter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 488-495.
- [12] 黎高平, 杨鸿儒, 杨斌, 等. 绝对吸收式激光能量计高精度校准技术研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 438-440.
- LI Gaoping, YANG Hongru, YANG Bin, et al. High-accuracy optical calibration technology for absolute-absorbing laser energy meter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 438-440.
- [13] Short exposure high power sensors - comet power pucks datasheet[EB/OL].[2024-08-04]. https://www.ophiropt.com/medias/sys_master/opresources/h73/hd7/9944425791518/Comet-1K_Comet-10K_Comet-10K-HD_2/Comet-1K-Comet-10K-Comet-10K-HD-2.pdf.
- [14] ZHU J, ZHAN H L, ZHAO K, et al. Thermal spallation in rock revealed by ultraviolet laser-induced voltage[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62(7): 974222.
- [15] 魏继锋, 蒋志雄, 卢飞, 等. 石墨锥型高能激光全吸收能量计设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0208006.
- WEI Jifeng, JIANG Zhixiong, LU Fei, et al. Design of graphite-cone-absorption-cavity absolute energy meter for high energy laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0208006.
- [16] 王振宝, 冯国斌, 陈绍武, 等. 全吸收旋转式高能激光能量计吸收腔设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1217010.
- WANG Zhenbao, FENG Guobin, CHEN Shaowu, et al. Design and analysis of absorbing cavity in full absorbing HEL rotational calorimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1217010.
- [17] 田健, 邓念平, 吴传听, 等. 不同量级下激光功率测量方法探讨与研究[J]. *计量与测试技术*, 2017, 44(12): 41-42.
- TIAN Jian, DENG Nianping, WU Chuanxin, et al. Study on laser power measurement method under different orders of magnitude and research[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2017, 44(12): 41-42.
- [18] 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(7): 0706004.
- 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(7): 0706004.
- [19] Datasheet cube, cube L[EB/OL].[2024-08-04]. https://www.primes.de/en/products/laser-power/briefradiation/cube.htmlfile=files/userFiles/downloads/Datenblaetter%20EN/Cube_EN_v8-0_EN_web.pdf.