

基于光压原理的大功率激光功率测量

于东钰 俞兵 吕春莉 董再天 杨科 宫经珠 段园园 陈超 张魁甲 黎高平 郑波

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

YU Dongyu, YU Bing, LYU Chunli, DONG Zaitian, YANG Ke, GONG Jingzhu, DUAN Yuanyuan, CHEN Chao, ZHANG Kuijia, LI Gaoping, ZHENG Bo

引用本文:

于东钰, 俞兵, 吕春莉, 等. 基于光压原理的大功率激光功率测量[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 798–802. DOI: 10.5768/JAO202243.0407002

YU Dongyu, YU Bing, LYU Chunli, et al. High-power laser power measurement based on principle of light pressure[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 798–802. DOI: 10.5768/JAO202243.0407002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0407002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于动态核主元分析的大功率LED阵列动态光源在线状态观测与故障诊断

On-line state observation and fault diagnosis of high-power LED array dynamic light source based on dynamic kernel principal component analysis

应用光学. 2021, 42(4): 728–734 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403006>

532 nm激光辐照下ZnSe薄膜光学特性研究

Optical properties of ZnSe film under 532 nm laser irradiation

应用光学. 2018, 39(6): 929–935 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607003>

亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

应用光学. 2019, 40(1): 138–142 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107002>

减反膜的梯度化与激光损伤阈值之间的关系研究

Relationship between gradient of antireflection film and laser induced damage threshold

应用光学. 2019, 40(1): 143–149 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107003>

空间旋转多光轴平行性校准技术

Spatial rotation multi-axis parallelism adjustment and calibration technology

应用光学. 2018, 39(5): 627–632 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501006>

外腔半导体激光器在低高温下的机械形变与功率变化

Mechanical deformation and power change of external cavity semiconductor laser under temperature change

应用光学. 2021, 42(4): 586–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 04-0798-05

基于光压原理的大功率激光功率测量

于东钰¹, 俞 兵¹, 吕春莉¹, 董再天¹, 杨 科¹, 宫经珠¹, 段园园¹,
陈 超¹, 张魁甲¹, 黎高平¹, 郑 波²

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西安航天动力技术研究所, 陕西 西安 710025)

摘 要: 大功率激光功率测量常用量热法, 但溯源复杂。介绍了具有较高测量精度的基于光压原理的大功率激光功率测量方法, 设计了利用 $1/10^5$ 精度天平大功率激光测量实验, 测试了基于 GaAs 半导体材料制作的反射镜的反射率及损伤阈值, 确定了基于 GaAs 半导体材料反射镜的相关性能。得到了普通实验室条件下的功率测量重复性及线性, 验证了 $1/10^5$ 精度天平用于大功率激光测量的可行性。通过实验结果结合理论计算, 得出利用 $1/10^5$ 精度天平的光压测量功率的测量上限可以达到 3×10^4 W 以上。

关键词: 大功率激光; 光压; 天平; 损伤阈值

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202243.0407002](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0407002)

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

YU Dongyu¹, YU Bing¹, LYU Chunli¹, DONG Zaitian¹, YANG Ke¹, GONG Jingzhu¹,
DUAN Yuanyuan¹, CHEN Chao¹, ZHANG Kuijia¹, LI Gaoping¹, ZHENG Bo²

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Institute of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: The calorimetry is commonly used for high-power laser power measurement, but the traceability is complicated. The high-power laser power measurement method based on principle of light pressure with higher measurement accuracy was introduced, the measurement experiment using a balance with an accuracy of $1/10^5$ was designed, the reflectivity and damage threshold of the mirror based on GaAs semiconductor materials were tested, and the properties of mirrors based on GaAs semiconductor materials were determined. Under ordinary laboratory conditions, the power measurement repeatability and linearity were obtained, and the feasibility of balance with an accuracy of $1/10^5$ for high-power laser measurement was verified. Through the experimental results combined with theoretical calculations, it is concluded that the upper limit of the measurement power of light pressure can reach more than 3×10^4 W by using the balance with an accuracy of $1/10^5$.

Key words: high-power laser; light pressure; balance; damage threshold

引言

光纤激光器由于具有聚焦能力强、输出功率大、体积小、重量轻、寿命长、成本低等优势, 在激光切割加工等方面有着广泛的应用。目前, 大功率光纤激光器技术已取得重大突破, 单模掺镱光纤激光器单元最大输出功率已达到万瓦量级。我

国大功率激光测量方法主要分为积分球法和量热法^[1-2]两种。积分球法: 随着激光功率的增大, 积分球体积急剧增大且溯源复杂, 不宜操作; 量热法研制的激光功率能量计体积大、重量重, 分项溯源, 不确定度评定复杂。所以大功率激光器的研制、生产、装备单位, 对操作简单使用方便的激光功率

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2022-06-06

基金项目: 国防计量技术基础科研项目 (JSJL2019208B001)

作者简介: 于东钰 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光参数计量测试方面的研究。E-mail: tigerydy@126.com

测量设备具有迫切需求。光压法是用于测量大功率激光测量的理想方法, 具有精度高、重量轻、响应时间快等优点。而且直接溯源到力学标准, 拓展了激光功率的溯源途径, 极大地提高了高能激光功率的测量不确定度, 测量精度有望从量热法的 3% 改善到 2% 以内^[1-7]。

1 测量原理

光是由光子组成的, 光子不仅具有能量, 而且具有动量。设光速为 c , 频率为 ν , 波长为 λ , 则光子的能量 E 和动量 $\vec{P}$ 分别为

$$E = h\nu \quad (1)$$

$$\vec{P} = h\nu/c \quad (2)$$

当光子与物质发生相互作用被物体吸收或反射时, 光子把它的动量传给物体, 因此它将对物体施加力的作用, 这就表现为光压。光压 F 与动量 P 的关系为

$$F = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{dE}{c \cdot dt} = \frac{P}{c} \quad (3)$$

式中: $\vec{P}$ 为动量; E 为光能量; c 为光速; P 为光功率。

如果光以 θ 入射角入射到反射镜上, 则垂直作用于反射镜上的力为

$$F = (2P/c)r\cos\theta \quad (4)$$

所以, 光功率可以写为

$$P = cF/(2r\cos\theta) \quad (5)$$

式中: F 为垂直于镜面上的力; P 为光功率; c 为光速; θ 为入射角; $r = R + (1 - R)\alpha/2$, R 为镜面反射率, α 为镜面吸收率^[5-8]。

2 测量装置组成

按照光压与功率的关系, 测量光对物体表面的力就可以测出入射光功率。如果镜子为理想反射体即反射率为 1, 则功率与力的转换系数为 $2/c = 6.67 \times 10^{-9}$ N/W, 1 000 W 激光正入射到物体表面, 对应的光压力为 6.67×10^{-6} N。1/10⁵ 精度天平理论压力分辨率为 0.1×10^{-6} N, 可以实现 1 000 W 激光功率测量。所以基于 1/10⁵ 精度天平, 搭建了 1 000 W 激光功率测量装置。装置包括用于入射激光角度调节的反射镜 1, 用于天平测量的反射镜 2, 用于功率比较的量热激光功率计^[9-13], 如图 1 所示。

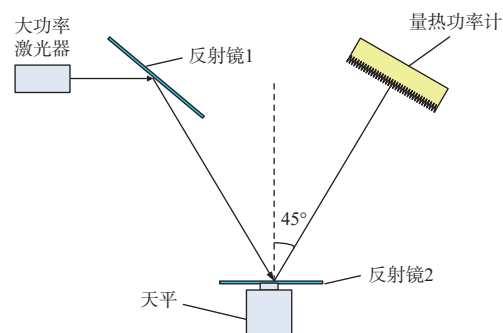


图 1 测量装置组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring device composition

工作原理为: 大功率激光器经过反射镜 1 调整光束角度, 使光束以 45° 角入射到天平上的测量反射镜, 测量反射镜再将光束以 45° 角反射出去, 进入到量热法激光功率。量热法功率计和光压法功率计的测量结果可以相互验证。激光器使用海富光子 1 000 W/1 080 nm 波长激光器, 天平使用沈阳龙腾公司 1/10⁵ 精度天平, 实际分度值为 0.01 mg, 应用在本系统中, 理论可分辨激光功率为 20 W。量热法功率计为国防科技工业光学一级计量站研制, 功率测量精度为 3%。

3 实验结果与分析

3.1 反射率测量实验

反射镜直接承接大功率激光时, 面损伤概率最大。为了防止损伤, 反射镜需要具备较高的反射率, 将加工的反射镜利用光学一级计量站研制的高反射率测量装置进行反射率测量, 该装置测量重复性可以达到 0.01%。反射率的测量光路如图 2 所示, 先由 1 064 nm 激光器发射激光, 激光功率为 0.5 mW 左右。经稳功率仪后, 可得到稳定的偏振光, 经 1/2 波片后变为线偏光。激光经分束镜后分为 2 束激光, 其中一束激光的功率直接被监视探测器记录, 另一束激光经待测反射镜反射后被测量探测器记录, 测量探测器安装于圆形导轨上, 可以运动到圆弧上的任意位置。放入待测反射镜前, 需要测量主光路中的激光功率。放入待测反射镜后, 需要测量被反射镜反射的主光路功率, 并计算 2 次激光功率的比值, 可获得待测反射镜在该波长下的反射率。稳功率仪可以将激光功率稳定在 0.1% 以内, 不满足高精度反射比的测量要求。所以引入了分束镜, 利用分束镜及监测探测器来监视激光功率的变化, 并通过同步采样的方式得到测量探测器与监视探测器的比值, 从而消除激光功率变化对反射比测量的影响, 结果如表 1 所示。

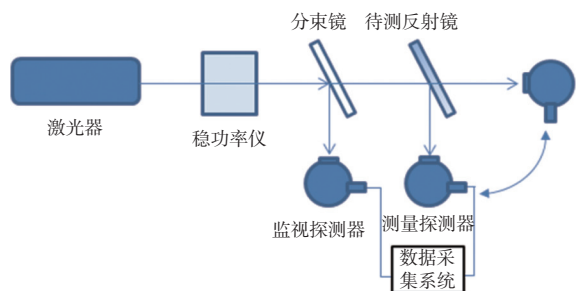


图 2 反射率测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of reflectance measurement

表 1 反射率测量值

Table 1 Measurement results of reflectance

测量次数	反射率/%
1	99.986
2	99.983
3	99.989
4	99.989
5	99.991
6	99.983
7	99.983
平均	99.986

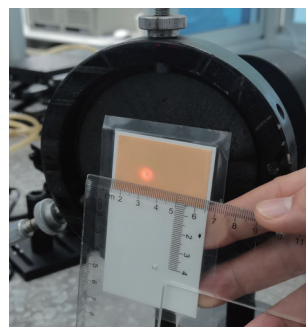
3.2 损伤实验

由于反射镜的反射率并不是 100%，所以必然有光线会通过反射膜进入反射镜内部。部分光功率被基底吸收，产生热效应，从而造成反射镜损伤破裂。由于反射镜具有较高的反射率，所以要造成损伤则需要较大的激光功率^[14-15]。考虑到安全性及实验条件，将损伤实验分为两部分：第一部分为基底损伤实验，利用未镀膜 GaAs 基底进行损伤实验，测出基底的损伤阈值，可以通过透过率计算出不考虑膜层损伤时高反射率镜的损伤阈值；第二部分为膜层损伤实验，利用现有激光器将激光光斑缩束，从而观察膜层损伤情况。以膜层和基底损伤所需的最小激光功率为准，确保整个反射镜可以安全地进行未来的实验。

如图 3 所示，基底损伤实验利用光斑大小约为 5 mm 的 1.064 μm 激光照射镜 GaAs 为基底，当激光功率达到 32 W 的时候基底碎裂。因为激光光斑空间近似为高斯分布，所以 GaAs 基底可以承受的激光功率密度约为 326.11 W/cm²。按照反射率为 99.98% 计算，即便入射光斑大小为 5 mm，反射镜仍可以承受约 1.6 MW 的激光入射，所以 GaAs 材料作为高反射镜基底可以满足使用需求。



(a) 基底损伤实物图

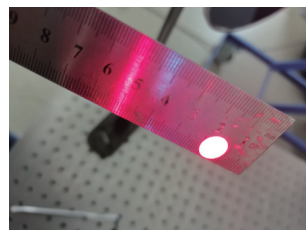


(b) 激光光斑大小实物图

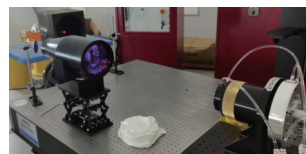
图 3 基底损伤实验实物图

Fig. 3 Physical photo of substrate damage experiment

膜层损伤实验利用激光功率为 1.5 万 W 的激光器，激光器波长为 1 080 nm，光斑大小为 50 mm，利用缩束系统将光斑大小缩小到 9 mm 左右，如图 4(a) 所示。对 2 个反射镜同时进行照射，实际光路如图 4(b) 所示。进行长达 20 s 的照射后，2 个反射镜的膜层无损伤，考虑激光光斑为高斯光束，反射镜可以承受的光功率密度为 94 361 W/cm²，所以研制的反射镜可以满足目前大部分激光器的功率测试需求。



(a) 激光光斑大小实物图



(b) 损伤实验现场图

图 4 膜层损伤实验实物图

Fig. 4 Physical photo of membrane damage experiment

3.3 功率测量实验

由于光压属于微小力测量，因此震动、空气

对流等环境变化对测量结果的影响都很大。按照前期对沈阳龙腾天平的使用经验,人员走动、呼气等均会对测量结果造成影响。所以精确测量光压需要严格地控制环境,如果有条件可以在真空环境中进行实验,实验时应保证光学平台没有较大的晃动。

目前,由于实验条件限制,没有对空气对流等环境影响作良好的隔离。为了防止大功率激光对空气造成较强的热效应从而导致实验失败,所以只做了 1 000 W 及 500 W 的激光功率测量实验,实验现场如图 5 所示。激光水平入射,利用第 1 个高反射镜调整激光入射角度,使激光以近乎 45°角入射到天平反射镜上,出射光被热电功率计吸收测量。



图 5 实验现场图

Fig. 5 Experimental site

实验时,天平的玻璃舱盖均为关闭状态,这样可以消除部分外界空气对流的影响。但是由于天平玻璃是普通玻璃、对激光吸收较强,长时间的照射极有可能造成玻璃破裂等安全事故,同时玻璃升温后也会导致玻璃舱内部空气产生热对流,所以实验时照射时间控制在 10 s 左右,照射完成后待玻璃温度下降到室温后进行下一次测量。

利用 500 W 激光进行 10 s 左右的照射后停止,连续进行 6 次,实验结果如图 6 所示。

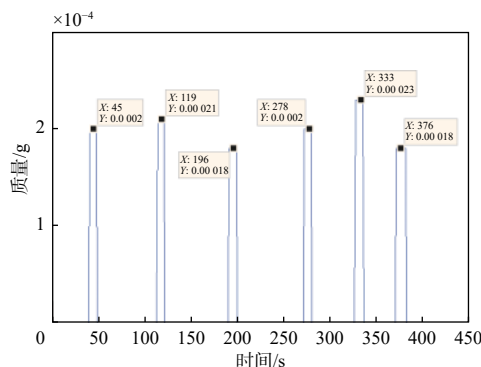


图 6 500 W 激光功率测量结果图

Fig. 6 Measurement results diagram of 500 W laser power

利用 1 000 W 激光进行 10 s 左右的照射后停止,连续进行 6 次,实验结果如图 7 所示。

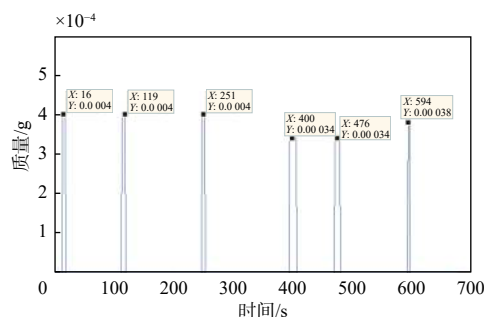


图 7 1 000 W 激光功率测量结果图

Fig. 7 Measurement results diagram of 1000 W laser power

地球的重力加速度 $g=9.8 \text{ N/kg}$,天平重量与力对应的关系为 $F=m \times g$,光速常数 $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$,由于反射率较高 $r \approx 1$,取每次光入射前与入射后的差值,按照(5)式计算光功率,得到结果如表 2 所示。

表 2 激光功率测量值

Table 2 Measurement results of laser power

500 W激光功率测量结果			1 000 W激光功率测量结果		
次数	光压法测量功率/W	量热法测量功率/W	次数	光压法测量功率/W	量热法测量功率/W
1	415.8	409	1	831.6	806
2	436.6	415	2	831.6	783
3	374.2	413	3	831.6	776
4	415.8	417	4	706.8	773
5	478.1	418	5	706.8	773
6	374.2	404	6	790.0	772
相对测量标准差	9.4%	1.3%	相对测量标准差	7.8%	1.7%

4 结论

本文通过搭建光压法实验平台,得到了光压测光功率的测量结果。测量结果表明,千瓦级别的激光功率可以通过 $1/10^5$ 精度天平进行测量。但是实验选用的国产天平进行千瓦级别的激光功率相对测量标准差为 9.0%,与国外报道水平还有一定差距。

激光功率相对测量标准差较大主要有 3 个原因:一是测量环境较差,由于大功率激光会对空气、反射镜等有一定的热效应导致产生微弱的空气扰动,进而影响测量结果;二是天平重复性较差, $1/10^5$ 天平是国内目前最高精度天平,其重复性、抗环境干扰能力,与国外天平相比还有一定差距;三是测量激光功率较小,激光功率小、光压值

接近天平的测量精度极限,从而导致测量精度偏低。

下一步我们将改进实验装置,对空气对流等环境影响进行屏蔽,对更大功率的激光进行测量,期望取得更好的实验结果。但相比于量热法,光压法在大功率激光测量中还是具有优势。光压法将光学功率直接溯源到力学量,简化了溯源途径,提高了测量不确定度,这将会极大地提高大功率激光功率测量水平,并在大功率激光测量领域产生较大的进步。

参考文献:

- [1] 黎高平, 陈超, 李栋, 等. 高能大功率激光参数测量技术研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(4): 645-650.
LI Gaoping, CHEN Chao, LI Dong, et al. Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 645-650.
- [2] 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.
- [3] 孙铭远, 张昊春, 曲博岩, 等. 激光辐照下卫星筒体部分多物理建模及毁伤效应分析[J]. *应用光学*, 2021, 42(3): 542-549.
SUN Mingyuan, ZHANG Haochun, QU Boyan, et al. Multi-physical modeling and damage effect analysis of satellite cylinders under laser irradiation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 542-549.
- [4] 陈超, 黎高平, 张彪, 等. 高能激光远场辐照度分布测量技术及其进展[J]. *应用光学*, 2020, 41(4): 675-680.
CHEN Chao, LI Gaoping, ZHANG Biao, et al. High energy laser far-field irradiance distribution measurement technology and its developments[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 675-680.
- [5] LAI W C, ZHOU P. Review on recent research progress on laser power measurement based on light pressure[J]. *SPIE*, 2018, 10710: 1029-1036.
- [6] 李铁映, 杨慧, 王海红. 导航卫星光压建模及表面光学特性参数影响分析[J]. *宇航学报*, 2015, 36(6): 731-738.
LI Tieying, YANG Hui, WANG Haihong. Navigation satellite solar radiation pressure modeling and analysis of the effect of surface optical parameters[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(6): 731-738.
- [7] 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.
- [8] AGATSUMA K, FRIEDRICH D, BALLMER S, et al. Precise measurement of laser power using an optomechanical system[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 2013-2030.
- [9] WILLIAMS P, SIMONDS B, SOWARDS J, et al. Measuring laser power as a force: a new paradigm to accurately monitor optical power during laser-based machining operations[J]. *SPIE*, 2016, 9741: 151-158.
- [10] NESTEROV V, MUELLER M, FRUMIN L L, et al. A new facility to realize a nanonewton force standard based on electrostatic methods[J]. *Metrologia*, 2009, 46(3): 277-282.
- [11] WILLIAMS P A, HADLER J A, LEE R, et al. Use of radiation pressure for measurement of high-power laser emission[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4248-4251.
- [12] MA D K, GARRETT J L, MUNDAY J N. Quantitative measurement of radiation pressure on a microcantilever in ambient environment[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 091107.
- [13] MELCHER J, STIRLING J, CERVANTES F G, et al. A self-calibrating optomechanical force sensor with femtonewton resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(23): 233109.
- [14] KOCH P, COLE G D, DEUTSCH C, et al. Thickness uniformity measurements and damage threshold tests of large-area GaAs/AlGaAs crystalline coatings for precision interferometry[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36731-36740.
- [15] 李再金, 胡黎明, 王 烨. 808 nm 掺铝半导体激光高损伤阈值腔面膜制备[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1034-1119.
LI Zaijin, HU Liming, WANG Ye, et al. Fabrication of 808 nm Al-containing semiconductor laser diode high damage threshold facet coating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1034-1119.