

文章编号: 1005-5630(2023)05-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.005.001

基于光辐射压力的激光功率测量技术

王 成^{1,2}, 杜 根^{1,2}, 熊利能^{1,2}, 许 颢¹, 程 玉¹, 罗雨祥¹, 毛世峰¹,
王林毅¹, 周毅刚¹, 项华中^{1,2}, 郑 刚¹

(1. 上海理工大学 生物医学光学与视光学研究所, 上海 200093;

2. 上海理工大学 教育部医用光学技术与仪器重点实验室, 上海 200093)

摘要: 随着激光应用领域的快速拓展, 超高峰值功率、超窄脉宽逐渐成为未来激光行业的重点研究方向之一, 这种激光的超高电场能量给高精度的激光功率测量提出了挑战。传统的激光功率测量方法, 如光电法、热释电法、量热法等逐渐显露出不适用于上述激光功率测量的缺点, 此外上述方法都难以实现实时、在线测量。为了克服以上困难, 需要一种新型激光功率测量原理与方法。以美国国家标准与技术研究院为代表的机构提出了一种光辐射压力测量法, 该方法使激光作用在高反射率的反射镜上, 激光动量形成了光辐射压力, 这个力可以采用多种力学传感方式进行计量。该方法不但能实现激光功率快速、准确测量, 而且不影响激光能量传输, 可以实现实时、在线的激光功率测量。系统回顾了国内外通过光辐射压力测量激光功率的基本原理和系统组成, 光辐射压力测量激光功率的研究现状, 并对该方法的发展方向进行了展望。

关键词: 光辐射压力; 超高峰值功率; 超窄脉宽; 激光功率; 测量不确定度

中图分类号: O 436 **文献标志码:** A

Laser power measurement technology based on light radiation pressure

WANG Cheng^{1,2}, DU Gen^{1,2}, XIONG Lineng^{1,2}, XU Yang¹, CHENG Yu¹, LUO Yuxiang¹,
MAO Shifeng¹, WANG Linyi¹, ZHOU Yigang¹, XIANG Huazhong^{1,2}, ZHENG Gang¹

(1. Institute of Biomedical Optics and Optometry, University of Shanghai for

Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Key Laboratory of Medical Optical Technology and Instruments of Ministry of Education, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: With the rapid expansion of laser application fields, the laser with ultra-high peak power and ultra-narrow pulse width has gradually become one of the important research directions of the laser fields in the future. These laser with ultra-high electric field energy posed a challenge for high precision laser power measurement. And the traditional methods of laser power measurement, such

收稿日期: 2023-01-19

基金项目: 上海市科学技术委员会创新行动计划(21S31902700)

第一作者: 王 成(1977—), 男, 副教授, 研究方向为生物医学光学与医用激光技术。

E-mail: shhwangcheng@163.com

as photoelectric method, pyroelectric method and calorimetry etc., have gradually revealed the disadvantages that they are not suitable for the abovementioned laser. Besides, these traditional methods are difficult to achieve real-time online measurement. In order to overcome these difficulties, a new method of laser power measurement is needed. Therefore, a method of light radiation pressure for laser power measurement is proposed by the organization represented by the National Institute of Standards and Technology. This method makes the laser incident on the mirror with high reflectivity, and the momentum of laser photon converts into light radiation pressure on the mirror, and the light radiation pressure can be measured by a variety of mechanical sensing modalities. It can not only achieve rapid and accurate measurement of laser power, but also have no influence on laser transmission. Besides real-time online laser power measurement is also possible. In this paper, the basic principle, the system, and the research status of laser power measurement using optical radiation pressure method at domestic and foreign were reviewed systematically. The future developments of this method were discussed in detail.

Keywords: light radiation pressure; ultra-high peak laser power; ultra-narrow pulse width; laser power; measurement uncertainty

引 言

激光是 20 世纪 60 年代出现的一种新型光源, 自问世以来便得到飞速发展^[1]。目前激光技术作为工业、医疗等领域的核心驱动力之一, 其自身也随着相关领域的发展而不断向前发展, 总的来说, 激光技术正在向着“超高、超快、更好、更短”4 个方向继续发展。超高, 即激光器的功率越来越高; 超快, 即激光器的脉冲宽度越来越窄; 更好, 即激光器所输出的光束质量越来越好; 更短, 即激光器的输出波长可覆盖更短的波段。在医疗领域中, 激光的应用主要分为强激光治疗、光动力治疗 (photodynamic therapy, PDT) 及弱激光治疗 (low-level laser therapy, LLLT) 3 大类^[2]。其中, 由于飞秒、皮秒等超短脉冲技术的成熟, 强激光治疗成为了这其中最热门的应用, 主要用于眼科、皮肤科、口腔科、耳鼻喉科等科室, 其中在眼科的应用发展最为热门。全飞秒激光小切口微透镜取出术在国内每年就有几十万例。因此, 根据临床治疗的需求变化, 医用飞秒激光器等超短脉冲技术已形成较大的产业规模。

激光功率/能量及其输出的稳定性是激光的重要量化指标, 是评判激光器优劣的基础且重要的参数之一。目前常用的激光功率测量技术主要

有光电法、热释电法、量热法及光辐射力法等^[3]。传统的激光功率测量法基本是吸收式测量, 即光子必须被吸收才能被测量, 这就意味着在特定应用场景中的激光功率无法被精确测量, 因为激光的测量与其应用操作不能同步完成。也可使用分光片分部分能量的光来测量以解决上述问题, 经过分束器的激光大部分用于预定用途, 小部分用于功率测量, 通过分束比例就可以计算出预定用途的功率大小^[4]。在常规激光功率或能量测量中^[5], 光电法基于光电效应, 即吸收光子能量转换为电子, 通过对每个光脉冲积分来获取每个脉冲能量, 这样能实现对低功率脉冲激光的精确测量, 但不能用于测量高功率激光。热释电法是通过吸收材料将能量转换为温升, 温度的改变使材料的两端出现电压或产生电流, 通过测量晶体的温度变化换算得到光功率。量热法是利用激光的热效应结合金属的热电效应, 读出探测器的两端电压就可以计算光功率。对于高功率激光, 光电法限于探测器光能的承受能力, 无法进行高功率的测量, 并且容易受干扰, 光谱响应不平坦; 热释电法适用于低功率激光的帧频采集, 使用要求较严格, 不适用于连续激光; 量热法的功率测量范围受其体积大小限制, 且响应速度较慢, 不能实现在线、实时测量; 光束取样法虽然有体积小优点, 但对取样比的准确性和稳定性要求极高, 而

且其测量准确度及稳定性都不如量热法。光辐射压力法是基于激光动量与激光功率的关系来测量的,这种方法的一个最大的优势在于不以吸收激光的能量来进行功率测量,这样就可实现在线实时监测。因此,光辐射压力法是测量超高功率、超短脉冲激光的最优选择之一。本文系统地回顾了光辐射压力法基本原理,测量系统的组成和当前的研究进展,通过这些总结指明其未来可能的发展方向。

1 光辐射压力测量原理

1871年,Maxwell^[6]推论出电磁辐射会对暴露在其中的物体表面施加压力。1873年,Crookes^[7]偶然发明了一种特殊的辐射计,其主体部分是一个部分真空的气密玻璃灯泡,内部有4个金属叶片,当光线照射时叶片会转动,光线越强转动越快,这种方法能进行简单的辐射压力强度测量。之后,尼克拉斯和赫尔通过实验证明了光辐射压力的存在。传统的吸收式测量方法在测量低功率(低能量)激光时,有着不错的测量精度,但是其测量范围受到吸收介质大小的限制,也就是吸收介质越大,测量范围也就越大。吸收介质大意味着响应时间更长,这样就无法满足连续测量的要求。由于仪器体积过大,测量也会受到测量环境的限制。光辐射压力法相比于传统测量方法的优点在于,它能在几乎不吸收激光的前提下完成对激光功率的测量,为激光应用过程中的在线、实时测量提供了解决方案。随着高精度干涉仪和压电陶瓷传感器等高精度位移传感器的成功研发,有关光致激发微小力的研究逐渐走向应用,而有关辐射压力的研究也不再局限于理论^[8-14]。

光辐射压力法主要是利用光子量子化特性和动量守恒定律。由于光子携带动量,当激光入射到反射镜时,光子携带的动量会给反射镜施加一个压力,这个压力即为光辐射力。压力大小 F 与动量 p 成正比,即与单位时间内入射光子的数量成正比,也即与光功率成正比。如果入射脉冲激光的能量为 E ,光速为 c ,那么其产生的动量为 $p=E/c$,根据动量定理,当正入射的动量为 p 的光子被物体完全反射时,会产生 $2p$ 的动

量作用在物体上。因此,当激光在反射镜上完成反射时,反射镜上产生的动量为 $2p$ 。所以光辐射压力 F 可写为

$$F = 2 \frac{dp}{dt} = 2 \frac{dE}{cdt} = \frac{2P}{c} \quad (1)$$

式中: p 为光子动量; c 为光速。

当激光以 θ 角入射到反射率为 r 的反射镜上时,由力的合成与分解原理可得

$$F = \left(\frac{2P}{c} \right) r \cos(\theta) \quad (2)$$

式中: r 为反射镜的反射率; θ 为激光入射角。由式(2)可以推出激光功率 P 的计算式为

$$P = \frac{dE}{dt} = c \frac{dp}{dt} = \frac{cF}{2r \cos(\theta)} \quad (3)$$

由式(3)可知,激光功率的计算受到 c 、 F 、 r 及 θ 4个参数的影响。对于 c ,主要考虑在不同介质中传播的影响,因此实验时通常要求环境为真空。对于 r ,有 $r=R+(1-R)\alpha/2$,说明在散射效应或吸收效应影响下,被反射镜吸收的光子会向镜子传递其全部动量,而被反射的光子会传递其2倍动量给反射镜。 α 是被吸收的光子数与总光子数的比值, R 是反射率,当忽略散射或吸收效应(即全反射)时,可认为 $r=R$,即 r 为理想状态下镜子反射率。实验时尽量选取高反射率的反射镜来降低散射效应或吸收效应。 θ 是激光入射角,可通过实验前的校准来减小其引起的误差。 F 是光辐射压力,主要通过位移传感器等元件测量由辐射力引起的测量元件的位移量,通过位移量计算得出。 F 主要受测量元件的精度影响。综上所述, F 是主要影响激光功率不确定度的因子。因此,为了降低激光功率测量的不确定度,光辐射压力 F 的测量成为了研究重点。

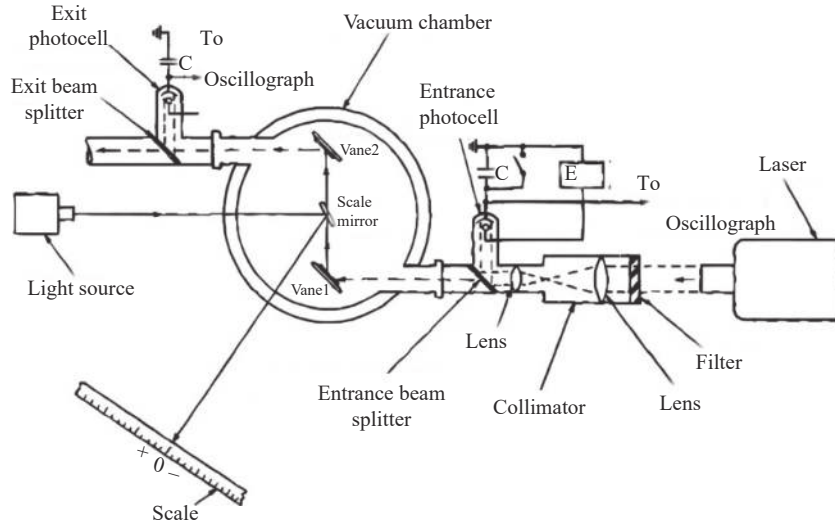
2 基于光辐射压力的功率测量方法

2.1 扭转式辐射压力测量

为了实现光辐射压力的测量,Stimler等^[15]提出了一种测量光子动量的方法(如图1所示),激光脉冲通过滤光片和准直器、分束器后进入真空室,穿过2个反射镜片后,射出真空室。脉冲

穿过反射镜时，镜子会发生偏转，通过光源和刻度尺可以读出反射镜的偏移角的变化值。该装置原理是将光束的光子动量转换为叶片的偏转角，将偏转变化值转换就可以得到激光脉冲能量值，

该装置的灵敏度为 $(2.55 \pm 0.04) \text{ cm/J}$ 。这种扭摆式功率计摆脱了传统吸收式测量的不足，但这种设计在测量时十分不方便，实用性很差，很难取代当时普及适用的测量方法。



Exit photocell: 出射光电管; Exit beam splitter: 出射分光镜; Entrance beam splitter: 入射分光镜; To oscillograph: 输出到示波器; Vacuum chamber: 真空腔; Entrance photocell: 入射光电管; Light source: 光源; Scale: 刻度尺; Lens: 透镜; Filter: 滤光片; Laser: 激光; Vane 1, 2: 叶片 1, 2; C: 电容; Collimator: 准直器; Scale mirror: 刻度镜; E: 电源

图 1 扭摆式功率计结构示意图

Fig. 1 Structure of torsional pendulum power meter

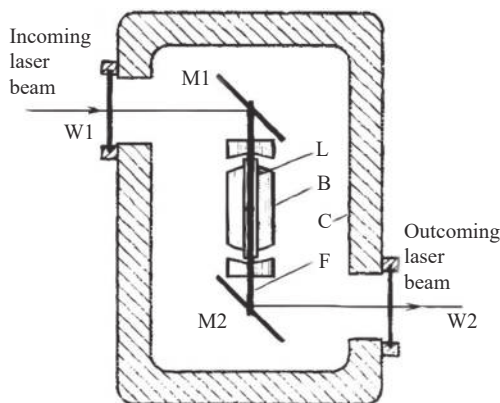
因此 Yuan 等^[16]在此基础上提出了一种新的方法，其结构如图 2 所示，C 为真空腔，W1 和 W2 为入射和出射窗口，激光从反射镜 M1 进入由线圈 L、磁钢和磁轭 B 及系统框架 F 组成的测量系统后，经另一个反射镜 M2 射出。激光辐

射压力驱动线圈，将测得的角速度转化为感应电动势，从而可以测得激光束的能量。仪器的测量不确定度为 3%，灵敏度为 $18.5 \mu\text{V/J}$ 。

上述方法首次提出了测量光子动量的概念，分别将光子动量转化为钟摆式偏转并通过线圈转化为感生电动势来进行测量。但该测量法仍存在时间响应缓慢，振荡周期长，操作环境要求严格，测量结果不可追溯，实用性差等缺点，从而会降低测量结果的准确性。

2.2 电容式辐射压力测量

美国国家标准技术研究院 (national institute of standards and technology, NIST) 的 Ryger 等^[17]提出了一种基于双弹簧机械结构的激光辐射功率计。将 2 个相同的弹簧串联使用，这样的结构能够减弱环境振动信号以及由传感器倾斜变化引起的误差，其结构如图 3 所示。经过硅微加工得到的弹簧能有效地缩小传感器的总体尺寸及惯性质量，因此能有效地提高测量系统的灵敏度和响应速度。入射激光在镜面镀膜硅盘 b 上产生辐射压



Incoming laser beam: 入射激光; W1: 窗口镜; M1: 反射镜; L: 线圈; B: 磁钢和磁轭; C: 真空腔; F: 系统框架; M2: 反射镜; Outcoming laser beam: 出射激光; W2: 窗口片

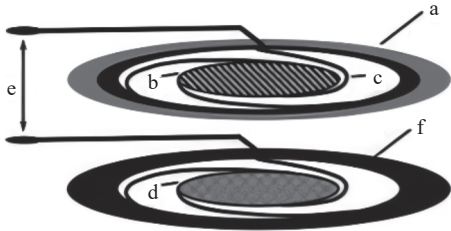
图 2 电磁式功率计结构示意图

Fig. 2 Structure of electromagnetic power meter

力, 将反射镜推向另一片结构, 极板间距减小, 会导致电容的变化, 为了使弹簧回到初始位置, 极板间的静电力会减小。通过光学干涉法测量双弹簧结构中高反射镜的位移值, 计算可得到激光的功率为

$$\Delta h = \frac{2rP}{ck} \cos(\theta) \quad (4)$$

式中: Δh 为板间间距; P 为激光功率; c 为光速; k 为弹簧的弹性系数; θ 为激光在反射镜上的入射角。



a: 支撑硅环; b: 镜面镀膜硅盘; c: 弹簧结构; d: 导电电极;
e: 传感设备的电气连接; f: 金属化的扩展焊盘

图3 双弹簧探测结构示意图

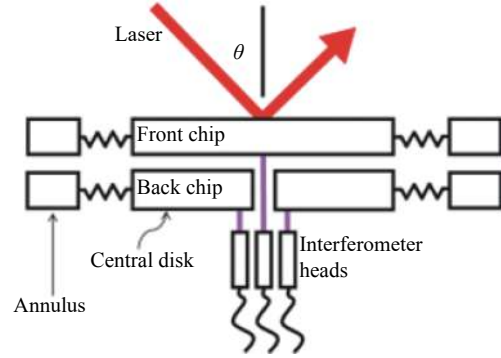
Fig. 3 Schematic diagram of double spring detection structure

在上述双弹簧辐射压力传感器的基础上, Artusio-Glimpse 等^[18]使用外部干涉仪来代替内部的电容传感结构, 提出了一款辐射压力功率计——“智能镜子”, 其优点是干涉测量不受硅弯曲的光导所引起的电容器边缘的光诱导变化的影响, 也不需要再在精密元件上涂覆金属薄膜。仪器使用双弹簧晶体硅弯曲设计, 结构如图4所示。其中, 前端芯片是高反射镜, 后端芯片是参考基准, 用于消除干扰。通过高精度干涉仪测量前端芯片位移及后端芯片上 $\pm 4 \text{ mm}$ 2个偏心点的位移值, 位移值与偏心点位移平均之差就是板间间距 Δh 。激光照射在前端芯片, 会在芯片上产生一个辐射压力作用到弹簧上, 当弹簧的恢复力与辐射力平衡时, 就达到了稳定状态, 此时的平衡方程为

$$k\Delta h = \frac{P}{c} [2R(\theta) + \alpha(1 - R(\theta))] \cos(\theta) \cos^2(\Phi/2) \quad (5)$$

式中: k 为弹性系数; P 为激光功率; c 为光速; $R(\theta)$ 为反射率系数; $\cos^2(\Phi/2)$ 是校正因子 (Φ 为光束发散角)。该方法是通过测量板间间距后, 由平衡方程将板间间距 Δh 换算为测量的

激光功率。实验证明, 在激光功率范围为 25~400 W 时, 该方法测量不确定度小于等于 3.2%。



Laser: 入射激光; θ : 激光入射角; Front chip: 前置芯片; Back chip: 后置芯片; Annulus: 安装支撑环; Central disk: 中央磁盘; Interferometer heads: 干涉仪头

图4 智能反射镜功率测量装置

Fig. 4 Smart mirror power measurement device

电容式测量法主要是使用微加工的电容传感器作为测量部分, 在减小尺寸和减轻质量的同时提高测量精度和测量速度, 但是其测量结果仍会受到热漂移和寄生电容的影响。

2.3 多反射式光辐射压力测量

研究表明, 在光辐射压力测量激光功率的过程中, 如果针对光辐射压力进行非相干放大, 可以有效地提高测量过程中的信噪比, 降低测量的不确定度。Artusio-Glimpse 等^[19]提出了一种激光压力高放大光学系统 (high amplification laser-pressure optic, HALO)。HALO 的第一个特点在于能与多种力传感器兼容, 其次就是 HALO 系统中所有的激光入射角都保持一致。整个系统由激光入射窗和多个反射镜模块组成, 该光学系统示意图见图5。激光由入射窗进入腔内, 到达反射镜模块, 然后在反射模块间不断反射, 最后由反射模块将入射激光重新定向到感应镜 (激光入射角始终为 45°)。实验表明, 使用该系统进行实验时, 当激光的入射功率为 10 kW 时, 测量不确定度为 0.26%; 当激光的入射功率为 1 kW 时, 测量不确定度为 0.46%。

类似地, Vasilyan 等^[20]使用 2 个高精度电磁补偿天平 (electromagnetic force compensation, EMFC) 组成力传感部分, 用 2 个平行的高反射率反射镜组成多反射结构, 提出了一种辐射功率

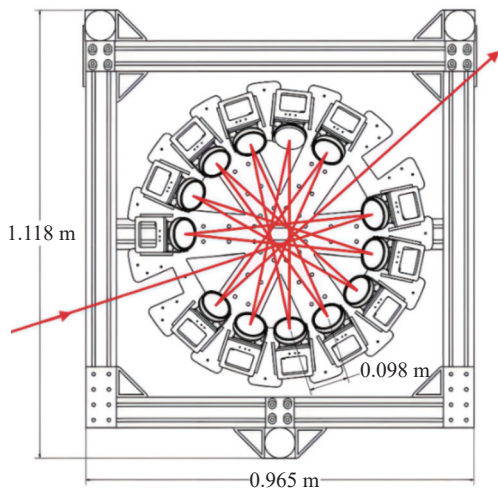


图 5 HALO 系统示意图(箭头为激光方向)

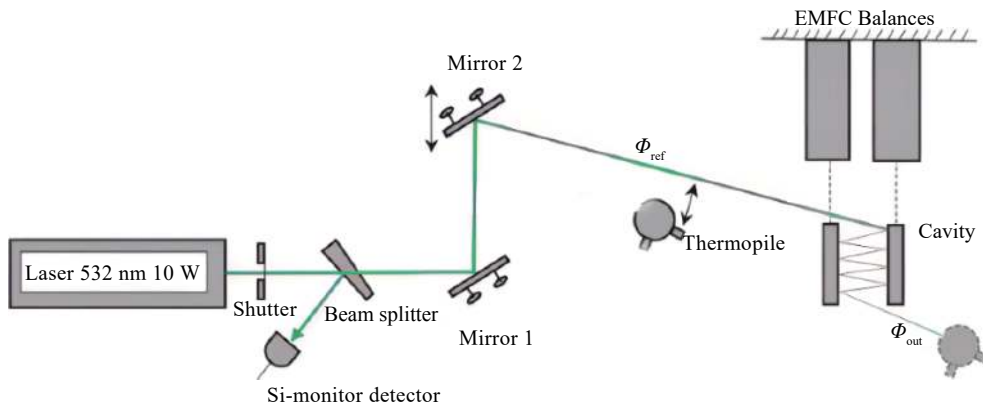
Fig. 5 Schematic diagram of HALO system (the arrow is the laser direction)

计。测量光路如图 6 所示, 激光经过分束器后, 利用硅光电二极管测量进入镜腔的光功率 Φ_{in} ,

入射激光经反射镜后进入多次反射的辐射压力测量系统, 同样利用硅光电二极管测量输出功率 Φ_{out} , 通过输入功率与输出功率的比值来计算镜腔的透过率 T , 由此可以计算出光路中激光的损失, 校准多反射结构对测量的影响。经校准后的热电堆功率计测量值 Φ_{ref} 作为参考值, 与 Φ_{out} 比较并得到经多次反射后辐射压力法的测量精度

$$P = \frac{c}{1 + R_L} \sum_{i=1}^N \frac{F_i}{R_L^{i-1}} \quad (6)$$

式中: c 为光速; R_L 为可忽略的光传输或吸收(值接近 1); N 为反射次数; F_i 为单次反射产生的辐射压力。实验证明, 当待测的激光功率在 1~10 W 这样小的功率范围内, 该系统的测量不确定度可降低到 1.7% 以下, 并且随着测量光功率、光束反射次数及反射镜反射系数的增加, 测量不确定度会进一步降低。



Laser 532 nm 10W: 532 nm 激光, 功率为 10W; Shutter: 光栅; Si-monitor detector: 硅监控探测器; Beam splitter: 分光镜; Mirror1, 2: 反射镜 1, 2; Thermopile: 热电堆传感器; EMFC Balances: 力传感结构; Cavity: 测量腔; Φ_{ref} : 测量参考功率; Φ_{out} : 输出功率

图 6 EMFC 测量实验光路图
Fig. 6 Optical path of EMFC measurement experiment

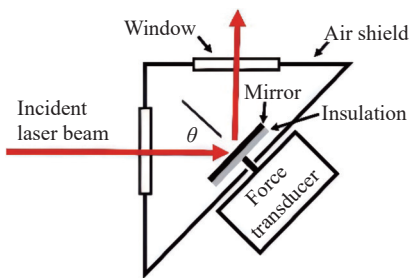
通过多次反射来加强传感器接收到的信号, 以提升测量精度, 该方法具有一定的可行性。但其缺点是, 组成多反射结构的光学元件在测量过程中产生的噪声是影响测量结果的最大因素。

2.4 便携式辐射压力测量

基于扭力平衡原理的辐射压力测量有着时间响应缓慢、振荡周期长、操作环境要求严格、测量结果不可追溯、不易携带等缺点。Williams 等^[21] 针对上述缺点, 将简单的商用传感器作

为测量元件, 开发了一种便携的辐射压力功率计 (radiation pressure power meter, RPPM), 其结构如图 7 所示。分别以 530W Yb 掺杂激光和 92 kW 二氧化碳激光作为实验光源, 该结构的测量不确定度分别为 7% 和 13%, 同时证明了所测力是光辐射压力而非热效应力, 排除了光与物质作用的其他因素干扰。为进一步提高测量的不确定度以及激光在使用过程中的可追溯性, 该团队^[22-23] 使用改良的商业天平作为力传感器设计了一款工业级的便携式辐射压力计, 可以对 1~100 kW 功

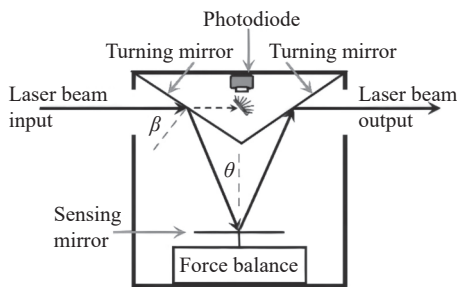
率范围内的连续激光进行测量, 并且不确定度可追溯至国际单位制精度。实验证明, 该装置的测量不确定度为 1.6%。除上述辐射压力计, 该团队还设计出了一种轴向力辐射计 (axial force radiometer, AFR)^[24], 其结构如图 8 所示。与 RPPM 相比, AFR 的特点在于: 能够在测量时实现激光的共线传输; 能测量垂直方向的力; 允许使用光电二极管测量光路中散失的光, 从而增加测量带宽。当待测激光功率在 1~10.8 kW 时, RPPM 与 AFR 的平均差异为 0.12%。



Incident laser beam: 入射激光; Window: 窗口镜; Air shield: 气罩; Mirror: 反射镜; Insulation: 绝缘垫; Force transducer: 力传感器; θ : 激光入射角

图 7 RPPM 结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of RPPM structure



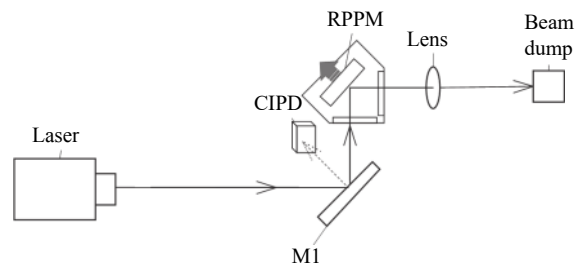
Laser beam input: 激光入射; Turning mirror: 转向镜; Photodiode: 光电二极管; Sensing mirror: 传感镜; Force balance: 力传感天平; Laser beam output: 激光出射; β, θ : 激光入射角

图 8 AFR 结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the structure of the AFR

能够产生太瓦甚至拍瓦等高峰值功率的高能激光器正在引领科学研究的前沿, 因此可以预见, 随着科学发展, 会有越来越多的大功率激光器。然而, 高脉冲能量和高平均功率的激光器让脉冲能量变得难以测量。国内有研究团队基于 $1/10^5$ 精度天平搭建了 1 kW 激光功率测量装置, 实验证明, 以 1 kW 功率的纳秒激光器作为光源时, 该装置的测量不确定度为 9%^[25]。而国外最

新研究已实现了无需采样下的 1 kW 平均功率激光的脉冲能量测量, 其测量不确定度为 2%, 并具有可追溯至国际单位制的精度, 即测量过程可以完全清晰地被描述, 精确度、准确度、测量范围以及稳定性经过严谨地研究与验证, 代表最高测量水平^[26]。将 RPPM 与电荷积分光电二极管 (charge integrator photodiode, CIPD) 结合组成辐射压力能量计 (radiation pressure energy meter, RPEM), 如图 9 所示。其中 CIPD 前有一个积分球和一个滤光片用来降低噪声及激光对 CIPD 的损坏。CIPD 用于测量反射镜 M1 上小部分散射光 (非镜面反射) 的功率, 可以实现对激光脉冲的快速、低噪测量, 但是该结果未被校准, 因此需要将其与 RPPM 产生的可追溯到国际单位制 (SI) 的平均激光脉冲能量的高精度 (尽管噪音更大、速度更慢) 的测量结果进行比较, 并以特定的几何形状和脉冲能级对 CIPD 进行校准, 可以实现对激光单脉冲的快速、低噪和高精度测量。



Laser: 激光; M1: 反射镜; CIPD: 电荷积分光电二极管; RPPM: 辐射压力功率计; Lens: 透镜; Beam dump: 光束收集

图 9 RPEM 测量光路图

Fig. 9 Optical path of RPEM measurement

上述便携式光压测量主要基于天平 (即力传感器), 采用取样法对激光功率测量并作为基准, 在测量范围内, 测量精度与镜片的反射率成正比。该方法的缺点主要是在测量较高功率激光时, 激光在镜片上产生的热效应会大大降低测量不确定度。

2.5 光辐射力测量方法总结

通过光子动量测量激光功率, 本质都是通过将激光功率转化为其他易测量的物理量, 如感应电动势、力等。扭摆式和电磁式是早期通过辐射压力测量激光功率的方法, 能初步对激光功率进行测量, 与传统吸收式测量相比, 测量精度仍然

不够,而且2种方法的实用性较差;电容式测量是使用2个极板组成测量结构,通过测量极板的位移来计算出辐射压力大小,进而得到所测激光功率,但是该方法的测量结果仍会受到热漂移效应和寄生电容的影响;通过多次反射对辐射压力进行非相干放大,能够有效降低测量时的信噪比,提高测量结果精度,但是多反射结构同样会引入噪声,干扰测量精度;便携式辐射压测量在具有一定程度的实用性的前提下,保证了一定范围内的测量可靠性,但是该方法的测量精度受到

全反射镜以及力传感器的影响。对于上述方法而言,当待测激光的功率在一定范围内时,能够呈现出良好的线性关系,面对功率较低或较高的激光时,则会受到较大的影响,并且在上述方法的测试过程中均未使用到皮秒甚至飞秒级别的超短脉冲激光来进行实验,各测量方法的性能比较见表1。光辐射压测量是测量高功率激光的理想方法,但目前仅限于对脉宽在纳秒以下的激光进行研究,并未挖掘出该方法的潜力。

表 1 光辐射力法测量激光能量(功率)的性能比较

Tab. 1 Performance comparison of laser energy (power) measurement by optical radiation force method

测量方法	测量范围	灵敏度(不确定度)	参考文献
扭摆式测量	0~3 J	(2.55±0.04) cm/J	[15]
电磁式测量	0.01~6 J	18.9 V/J	[16]
双弹簧电容式测量	0~250 W	(15.9±1.5) μV/W	[17]
“智能镜子”(1 070 nm)	25~400 W	≤3.2%	[18]
HALO系统	500~10 kW	0.46%(1 kW), 0.26%(10 kW)	[19]
EMFC系统	1~10 W	≤1.7%	[20]
RPPM	24~92 kW	13%	[21]
AFR	1~10.8 kW	2.1%(1~2 kW), 1.2%(2 kW以上)	[24]
基于1/10 ⁵ 精度天平测量	0~30 kW	9%	[25]
RPEM	1 kW(无需采样)	≤2%	[26]

3 展 望

随着激光在各领域的应用不断拓展,激光技术也在不断优化升级,高功率、窄脉宽成为激光行业的重点发展方向,标志着未来超短、超快激光等高功率激光技术的研究会成为重点。医学领域,以眼科屈光手术的应用为例,是高峰值功率、短脉冲激光的主要应用场景。激光的在线、实时监测是激光安全的有力保障。传统的以吸收光能量实现激光功率测量的方式或不适用于高功率激光;或响应时间过长实时性不高,只能测量平均功率;或测量精度高但测量范围有限;或探测方式受光谱响应能力的限制。在高功率激光的测量方面,采样法测量是目前的主流,但是其受到光学材料或光学膜层的激光损伤阈值的制约,

长时间的可靠性也很难保证。而通过光辐射压力来测量激光功率,不再直接将激光能量转化为探测的信号,而是通过光辐射力作用在一个传感端,即采用力学的传感方式,这与传统的光功率测量方法完全不同。因能量不直接作用在探测器的能量转换部件,这样的探测范围,特别是在超高功率探测方面有潜在的优势。此外,这种方式不吸收激光能量,则传感器可以不影响激光的传输,也就可以实现在线、实时的测量。目前该技术仅在激光加工领域有所应用,尚未得到普及,仍在研究阶段,相信随着该技术的发展成熟,未来在工业的应用范围会不断增大并拓展到其他领域,如医学,该技术能有效提升激光手术过程中的安全性及可靠性。这也说明开展此领域的研究具有广阔的空间。

以美国国家计量局为代表的国外团队在光辐

射力测量,以及实现激光能量测量方面提出了很多方案,而国内研究团队的研究成果相对较少,且研究进展与国外团队相比还有一定的差距。目前,虽然有很多采用激光辐射力来实现激光功率测量的研究成果,但是实现类似当前测量方式的普适性的测量仍面临一些挑战:1. 宽光谱范围的探测仍是难题之一。虽然光辐射压力测量是高反射地将激光反射出去,但是限于光学薄膜技术,超宽带、高反射率的反射镜设计与加工仍是一个重要挑战,因为要实现大光谱范围的探测,反射镜的光谱反射率的一致性也是重要的一环。2. 如何进一步地降低测量的不确定度,提高测量精确度?可以使用类似多反射光学系统结构来提高测量系统的信噪比;通过提高力传感器的精度,以实现更高精确度的测量;可以通过排除光与物质作用的其他动力学现象的干扰,如热膨胀和热辐射压效应等来提高测量的精确度;激光干涉测量位移量的精度是可以保证的,引力波的测量就给出了强有力的证明,可以采用激光干涉技术实现更高精度位移量的检测进而提高激光能量的测量准确度。3. 保证测量精度的前提下,要如何提高测量装置的测量范围?传统的激光能量测量受测量手段的限制,测量范围有一定的限制,在激光辐射压力测量方面,测量范围主要表现为力作用在传感器上实现的位移量的大小,这个位移量的测量范围就决定了激光功率的范围。这个问题可以从两个方面来进行分析。一方面,若光是脉冲输出方式的,可以采用强迫振动的理论架构,建立固有频率与受迫力的频率关系,建立频率与位移的曲线关系,在大强度激光输出时,可以采用高固有频率的传感器来降低传感端的振动幅值。而在低强度的激光输出时,可以采用与激光重复频率接近的传感器来提高振动幅值,这样就可以对脉冲激光实现大的测量动态范围。另一方面,对于连续输出的激光,辐射力作用下的位移量也基本是固定值,可以采用高线性的位移传感器来实现连续光的功率测量,如变面积的电容传感器、长波波段的激光干涉技术等。相信随着仪器科学的发展,上述问题会得到有效解决,光辐射压力的测量具有很多的优点,而有些优点具有将现有激光测量技术颠覆的潜力,未来基于激光辐射压力测量激光的能量或功率会有更好的发展,

并将推动激光相关行业的整体水平向更高、更快的方向发展。

参考文献:

- [1] FLEISCHER J M. Laser beam Width, divergence, and propagation factor: status and experience with the draft standard[C]//Proceedings of SPIE 1414, Laser Beam Diagnostics. Los Angeles: SPIE, 1991: 34 – 35.
- [2] 邱海霞,李步洪,马辉,等. 我国激光技术医疗应用和产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 14 – 20.
- [3] 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): 0900003.
- [4] BRANDT F, LECHER H, KUCK S. Traceable measurement of high laser power in the 1- μm spectral range[J]. NewRad. 2014: 269 – 271.
- [5] 黎高平,陈超,李栋,等. 高能高功率激光参数测量技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 645 – 650.
- [6] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. Oxford: Clarendon Press, 1873.
- [7] CROOKES W. XV. On attraction and repulsion resulting from radiation[J]. *Philosophical Transactions*, 1874, 164: 501 – 527.
- [8] MITRI F G. Electromagnetic radiation force on a perfect electromagnetic conductor (PEMC) circular cylinder[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 233: 21 – 28.
- [9] HSUEH Y C, YANG L F, WEBB K J. Enhanced optical pressure with asymmetric cavities[J]. *Physical Review B*, 2019, 99(4): 045437.
- [10] POŽAR T, LALOŠ J, BABNIK A, et al. Isolated detection of elastic waves driven by the momentum of light[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3340.
- [11] CHU Y J L, JANSSON E M, SWARTZLANDER G A JR. Measurements of radiation pressure owing to the grating momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(6): 063903.
- [12] MANSKE E, FRÖHLICH T, VASILYAN S. Photon momentum induced precision small forces: a static and dynamic check[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(10): 105004.
- [13] BETHUNE-WADDELL M, CHAU K J. Simulations of radiation pressure experiments narrow down the energy and momentum of light in matter[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2015, 78(12): 122401.

- [14] VASILYAN S, FRÖHLICH T, MANSKE E. Total momentum transfer produced by the photons of a multi-pass laser beam as an evident avenue for optical and mass metrology[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20798 – 20816.
- [15] STIMLER M, SLAWSKY Z I, GRANTHAM R E. Torsion pendulum photometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1964, 35(3): 311 – 313.
- [16] YUAN Y P. A new pulse laser energy meter[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1990, 61(6): 1743 – 1746.
- [17] RYGER I, ARTUSIO-GLIMPSE A B, WILLIAMS P, et al. Micromachined force scale for optical power measurement by radiation pressure sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(19): 7941 – 7948.
- [18] ARTUSIO-GLIMPSE A B, RYGER I, AZAROVA N A, et al. Miniature force sensor for absolute laser power measurements via radiation pressure at hundreds of watts[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13310 – 13322.
- [19] ARTUSIO-GLIMPSE A B, ROGERS K A, WILLIAMS P A, et al. High amplification laser-pressure optic enables ultra-low uncertainty measurements of optical laser power at kilowatt levels[J]. *Metrologia*, 2021, 58(5): 055010.
- [20] VASILYAN S, LÓPEZ M, ROGGE N, et al. Revisiting the limits of photon momentum based optical power measurement method, employing the case of multi-reflected laser beam[J]. *Metrologia*, 2021, 58(1): 015006.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] WILLIAMS P A, ARTUSIO-GLIMPSE A B, HADLER J A, et al. Radiation-pressure-enabled traceable laser sources at CW powers up to 50 kW[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(6): 1833 – 1839.
- [24] WILLIAMS P A, ROGERS K A, HADLER J A, et al. Axial force radiometer for primary standard laser power measurements using photon momentum[J]. *Metrologia*, 2021, 58(1): 015010.
- [25] 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.
- [26] WILLIAMS P A, ROGERS K A, DIVOKY M, et al. Extreme laser pulse-energy measurements by means of photon momentum[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 7383 – 7393.

(编辑: 李晓莉)