

激光与光电子学进展

激光功率计发展及应用

陈舒凡, 房丰洲*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 微纳制造实验室, 天津 300072

摘要 激光功率计广泛应用于测量连续激光功率或脉冲激光平均功率。快速准确的激光功率测量在科学研究和产业发展中具有十分重要的意义。本文系统介绍了各种激光功率计的工作原理, 并分析了各种测量方法中的优缺点, 讨论了功率测量的波长范围、量程和不确定度等参数。重点探讨了基于光致动力学的激光功率测量方法及发展潜力, 并对激光功率测量的未来发展及应用进行了展望。

关键词 光学器件; 功率计; 精度

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0900003

Development and Applications of Laser Power Meter

Chen Shufan, Fang Fengzhou*

Laboratory of Micro/Nano Manufacturing Technology (MNMT), State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Laser power meter is widely used in measuring the power of continuous laser and average power of pulsed laser. Fast and accurate measurement of laser power is of great significance in scientific research and industrial development. In this paper, the working principle of various laser power meters is introduced systematically. The advantages and disadvantages of various measurement methods, and the wavelength, measurement range and uncertainty of power measurement, are analyzed. The laser power measurement method based on photodynamics and its development potential are discussed. Furthermore, the future development and application of laser power measurement are prospected.

Key words optical devices; power meter; precision

OCIS codes 140.3460; 140.3295; 140.6810

1 前 言

激光起源于1917年Einstein发现的受激辐射现象^[1]。自1960年Maiman研发出第一台红宝石激光器以来^[2], 激光由于其单向性、单色性、偏振性以及高亮度等特性, 在科学研究及工业生产上迅速得到了广泛应用^[3-9]。随着激光应用在各个领域的逐渐深入, 如何快速准确地测量激光功率成为十分重要

的研究课题。

为了将激光的功率转化为电信号进行测量, 研究人员首先想到的是利用光电效应。1961年, Maiman等^[10]在研究固体中的受激辐射时, 利用光电管接收激光照射产生的电压特性, 首次测量了激光功率。随后, Li等^[11]于1962年利用热电偶测量了光功率。受到当时激光技术发展的限制, 此设备测量的是微波波段的电磁波功率。

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-08-30; 录用日期: 2020-09-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016FYB1102203)

*E-mail: fzfang@tju.edu.cn

随着激光功率测量应用领域的拓展,激光功率的测量出现了以下几种发展趋势:就波长范围而言,针对光刻和激光疗法等应用,被测量激光的波长范围从可见光扩展到紫外和红外波段;就功率值大小而言,对于光纤传感中的微弱光信号,需要对小至皮瓦级的功率进行测量,针对激光加工等,又需要对高达数十千瓦的激光功率进行测量;就测量精度而言,相对测量不确定度从最早的约 10% 发展到 0.1% 甚至更小。近年来随着各种测量原理的不断完善,以及新的测量需求出现,高精度激光功率的测量成为一个十分热门的研究课题。本文系统论述了典型激光功率计的测量原理、特点及其应

用,探讨了高精度激光功率测量面临的挑战以及未来的发展方向。

2 光功率测量原理

随着测量需求的发展,基于各种激光功率测量原理的激光功率计也陆续出现,包括热电式、光电二极管式、热释电式、流水式、低温绝对辐射计以及近些年出现的光致动力学传感形式等。研究人员在这些原理的基础上,利用现代的科学技术对不同情境下的激光功率测量方式进行了研发和完善,逐渐形成了如图 1 所示的各种典型激光功率测量系统^[11-16]。

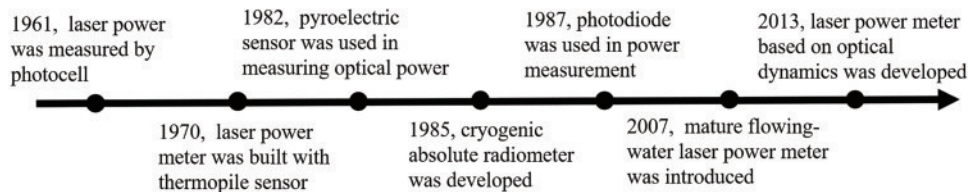


图 1 激光功率测量原理发展历程

Fig. 1 Historical process of laser power measurement development

2.1 光电二极管型

早期激光器由于功率较小,用光电型激光功率计进行测量即能满足使用要求。光电型激光功率计具有灵敏和快速的特点,是最早出现的功率计。光电二极管没有受到光照时,给二极管施加反向电压,会有一个很微弱的电流通过,即暗电流;受到光照后,光子的能量会传递给 PN 结中的束缚电子,产生电子空穴对,进而在反向电压的作用下产生电流,电流的大小与入射的光功率成正比,即

$$I = R_0 P, \quad (1)$$

其中 I 为光电流, P 为入射光功率, R_0 称为光电二极管的响应度。目前用于光功率测量的光电二极管主要是如图 2 所示的 PIN 型光电二极管,相比传统的 PN 型,这种结构增大了 PN 结中间的耗尽层,结电容小,响应速度更快。以 InGaAs 为材料的 PIN 管,由于其低噪声和高响应度等特性,在工业界和科学研究领域都可实现广泛的应用。

1987 年, Faaland 等^[16]提出了利用光电二极管测量激光功率的方法。发展到今天,基于光电二极管型光功率的测量已经成为一项十分成熟并广泛应用的技术^[17-29]。光电二极管型的激光功率计有很高的分辨力,可以达到 0.01 dBm^[23]。目前,实际生产中常用的光电二极管型光功率计有硅、锗、铟镓

砷、碲镉汞等类型,覆盖了从可见光到红外的较大波长范围。

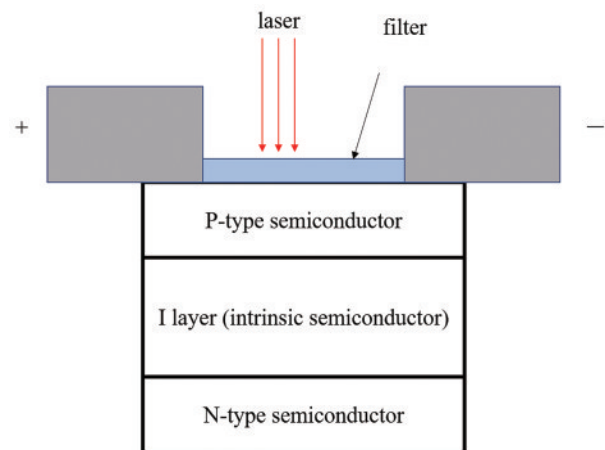


图 2 PIN 型光电二极管传感器结构

Fig. 2 PIN photodiode sensor structure

光电二极管型激光功率计的结构简单,因为没有利用光的热效应,对外界环境温度的要求比较低,相比于热效应功率计响应速度更快。缺点是更容易受到电噪声干扰,而且光谱响应不够平坦。

2.2 热电堆型

随着激光技术的发展,各种激光器相继问世。从最开始的固体激光器,到后来出现的气体激光器、液体激光器、半导体激光器,以及最近的自由电

子激光器,随着被测量的激光功率不断增大,功率的测量范围超过了光电型功率计的饱和阈值,因此,出现了可以测量更大功率的热电型功率计。热电堆式激光功率计是热电型光功率测量的典型器件,利用的是激光的热效应和金属中的热电效应。单个热电偶无法提供足够的探测灵敏度,通常需将多个热电偶串联或并联起来,使各个热电偶的输出电压相加,从而形成如图 3 所示的热电堆。激光被热电堆传感器的表面涂层吸收后,温度迅速上升,与热电堆探测器的另一端形成温度差,产生电压信号,电压的大小和温度成正比,即

$$\phi = \frac{U}{Z}, \quad (2)$$

其中 ϕ 为入射光功率, Z 为探测器的辐射灵敏度。通过读出热电堆两端电压就可以计算出光功率值的大小。

1970 年, West 等^[14]首次制作出了基于热电偶以及真空腔的激光功率探测装置。随后的 1973 年, Gunn 等^[30]提出了几种基于热效应的光功率测量结构。现在该类型的激光功率计不需要绝热环境就可以达到比较高的测量稳定性^[31-37],在测量标准值为 -10.000 dBm 的 850 nm 光源时测量的标准偏差可以达到 0.003 dBm^[37]。

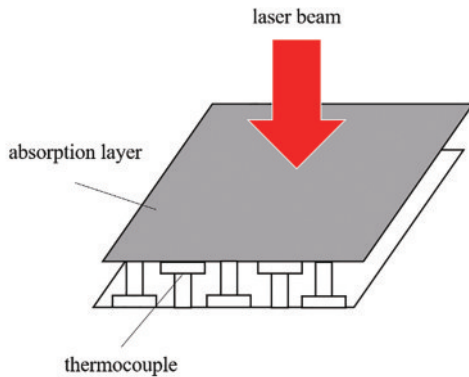


图 3 应用于激光功率检测的热电堆传感器结构

Fig. 3 Sensor structure based on electric thermopile for laser power measurement

热电型传感器具有光谱响应平坦、相对不容易达到饱和、受光照角度和位置影响较小等优点。缺点是响应速度比较慢。

2.3 热释电型

热释电传感器基于一些晶体的热释电效应进行传感。产生热释电效应的晶体内部存在自然电极化现象,温度变化时,热扰动造成晶格中的原子

产生轻微的运动,导致整个晶体的电极化状态发生变化,其表现为晶体的表面产生电荷,通过电路将其转化成电压输出就可以得到被测量的激光功率。传感器的示意图如图 4 所示。由于测量的是温度变化,热释电传感器一般不适合用来测量连续激光。基于热释电效应的功率计一般称为热释电能量计,适合测量单脉冲的能量。

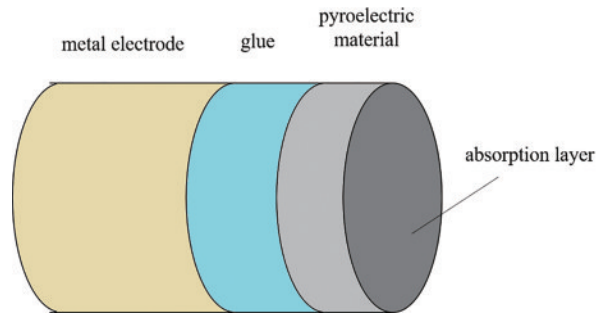


图 4 热释电光功率传感器基本结构

Fig. 4 Structure of pyroelectric sensor for optical power measurement

1982 年, Huang 等^[13]将热释电效应成功应用于激光功率的测量。目前热释电光功率测量系统精确度很高^[38-43],可以在典型值 1 mW 的测量条件下达到 0.5% 的测量精度^[42]。热释电型传感器的优点包括测量精度比较高、响应快、能测量单脉冲能量、对微小激光功率也能有比较明显的响应等。

2.4 低温绝对辐射计

随着光纤技术的广泛应用,研究人员也开始关心微小激光功率的测量,热释电型激光功率计应运而生。除了对功率范围的要求之外,在精度提升方面,对绝对辐射计的研究推动了激光功率计测量基准的建立,后来出现的低温绝对辐射计(图 5)使激光功率计的测量精度上限得到了飞跃性的提升^[44]。绝对辐射计结构的设计蕴含了等效替代的思想。首先让激光射入真空腔内对腔体进行加热,达到热平衡时用温度计测量温度,测量的结果为 T ,之后将入射光挡住,用电热丝对腔体进行加热,在相同温度 T 时,流过电热丝的电流为 I ,基于两种热平衡状态的等效性,可以得出

$$P_{\text{light}} = I^2 R. \quad (3)$$

温度接近 0 K 以及真空的测量条件下,这种测量结构被称为低温绝对辐射计,精确度非常高^[12, 45-47],该方法由 Martin 在 1985 年提出^[12]。现在的低温辐射计在测量波长范围为 500 nm~ 16 μm 的激光时,相对标准不确定度可以达到 0.015% ^[45]。

这种功率计的缺点是系统比较复杂且体积庞大,适合于科学研究,难以实现广泛的应用。

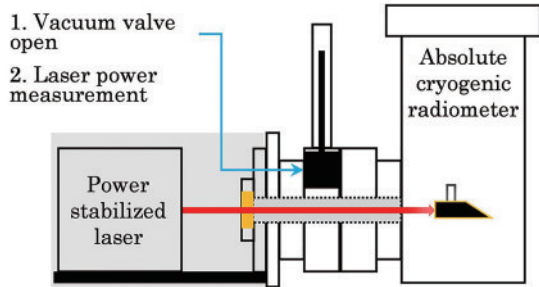


图 5 低温绝对辐射计测量系统示意图^[44]

Fig. 5 System diagram of cryogenic absolute radiometer^[44]

2.5 流水式

随着测量功率的进一步增大,热电型功率计会产生温漂,吸收面温度不断升高也会引起功率计的损伤,为了使功率计的损伤阈值提高,出现了各种针对大功率测量的结构。流水式是其中一种基于激光

的热效应对大功率激光进行功率测量的方法,如图 6 所示。与其他光功率计结构不同,流水式光功率计是在光吸收材料的内部增加了一层水层,水作为比热容比较大的液体,能有效地带走激光被材料吸收产生的热量。水流出加热区域之后,通过水的流速和测量点的水温就可以计算得到激光功率^[15, 48-50]。20 世纪 80 年代,中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所所在高能激光的计量研究中,对流水式激光功率计进行了深入的研究,通过接收器工作原理和结构设计等方面的创新,使激光能量的量程和量值复现能力提高了上千倍,达到了国际先进水平^[51]。这种类似于水冷装置的设计的最大优点是能测量很大的功率,最新进展是在 1~10 kW 的量程下,当包含因子 $k=2$ 时拓展不确定度为 1.6%^[48]。这种测量方式的缺点也比较明显,无法测量小功率,响应速度慢,无法准确得知激光功率随着时间的变化情况。各种典型激光功率计的特性如表 1 所示。

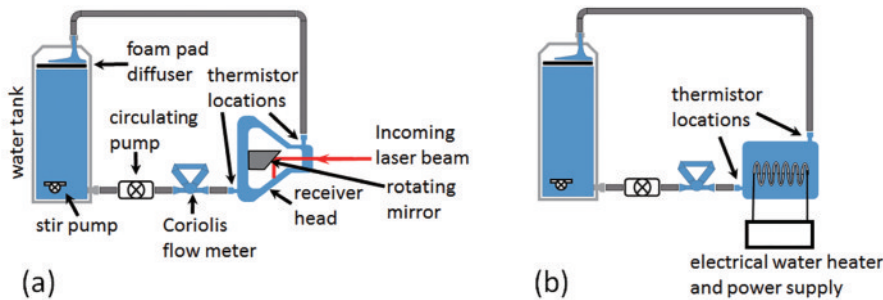


图 6 流水式光功率计示意图^[48]。(a)典型的流水式光功率计;(b)流水式光功率计的校准装置

Fig. 6 Diagrams of flowing-water optical power meter^[48]. (a) Typical flowing-water optical power meter; (b) calibration device of flowing-water optical power meter

表 1 典型光功率计的优缺点

Table 1 Characteristics of typical optical power meter

Method of laser power measurement	Advantage	Disadvantage
Photodiode	Relatively simple structure; the requirement of external temperature is not too strict; quicker response compared to laser power meters based on thermal effect	Lack of robustness for electromagnetic noise; bad spectral response
Thermopile	Flat spectral response; high saturation point; not sensitive to laser spot location and incident angle	Relatively slower response
Pyroelectric	High precision; fast response; ability to measure the energy of single laser pulse	Low durability
Cryogenic absolute radiometer (CAR)	Very high precision	Complicated measurement system
Flowing-water	Ability to measure the power up to tens of kilowatts	Low response speed

2.6 光致动力学传感

随着仪器测量精度的不断提高,光致微小力逐

渐成为激光功率测量的重要研究方向^[52-61]。光与物质相互作用产生的动力学现象比较复杂,针对激光

照射反射镜这一过程来说主要包含光烧蚀、热膨胀和辐射压效应。近些年来,由于高精度干涉仪和压电陶瓷传感器等高精度位移传感器的出现,对辐射压效应的研究不再局限于理论研究,对光致微小力的研究已逐渐走向了应用领域。2013年,Williams等^[62]提出了一种基于光致动力学进行光功率测量的方法,这种方法的优势在于可以在不吸收激光的情况下进行激光功率的测量,实时监测激光功率,而且根据反射镜的参数,可以实现较大波长范围及功率范围的激光功率测量。由于光致动力学的原

理是光在反射过程中和反射镜之间的作用,相比之前介绍的其他方法,光致动力学传感的一个很大优势是能在几乎不吸收激光的条件下实现光功率的测量,这为激光加工与测量等应用过程中的在线测量提供了有效的解决方案。

因为光致微小力造成的反射镜位移很小,研究人员为了测量出这个位移提出了几种新颖的测量系统结构^[63-67]。如图 7 所示,包括 Agatsuma 等^[66]提出的悬挂式反射镜的测量结构、Pinot 等^[64]提出的磁悬浮式结构、Ryger 等^[63]提出的弹簧平衡式结构等。

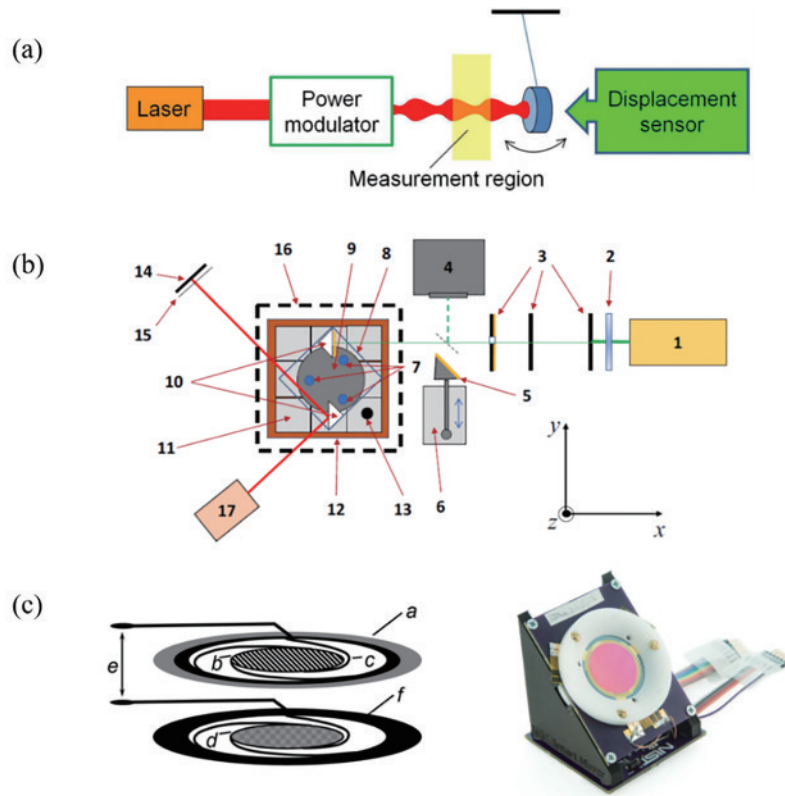


图 7 典型光致动力学光功率测量装置。(a)悬挂式测量结构^[66];(b)磁悬浮结构的测量装置以及校准装置示意图^[64];(c)由电容传感器集成的弹簧平衡式结构^[63]

Fig. 7 Typical diagrams of optical power measuring system by optodynamics. (a) Diagram of hanging measuring system^[66]; (b) diagram of measuring system and calibration of maglev structure^[64]; (c) spring structure integrated with capacitance sensor^[63]

除了以上典型方法之外,还有一些应对大功率激光功率测量的改进结构,比如积分球方法^[68-71]。这种方法是基于传统热电堆型激光功率计改进而来。图 8 给出一种典型的积分球结构,其利用凸面镜对光的散射作用,将本来应该照射在一点上的激光分散到整个吸收层上,再对吸收层的温度变化进行测量。这种将激光热作用分散的方法增大了探测器的损坏阈值,能简单快速地测量大功率连续激光的功率。

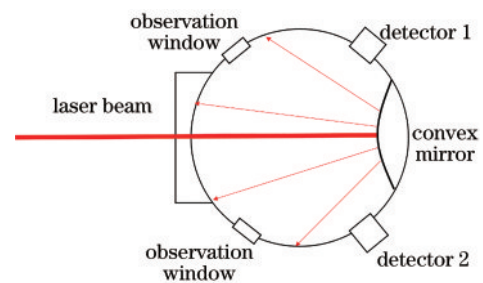


图 8 积分球结构示意图
Fig. 8 Diagram of integrating sphere

3 激光功率测量的典型应用

3.1 光通信

远距离光纤通信的核心部件之一是光中继器,在实际的应用中,光信号在光纤中传播 50 km 以上之后就会有明显的衰减,再经过更长的距离后信号就会十分微弱。光中继器的作用就是检测光纤信号传输过程中输出的微小功率,并将其进行放大和整形处理,使其进一步传播到更远的距离。光中继器的核心部件是光功率计,其分辨力直接影响光通信系统传播信息的误码率,灵敏度则影响光中继器架设的距离,功率计的响应时间直接影响信息传输速度的快慢。光功率计在光纤通信中的应用见图 9。

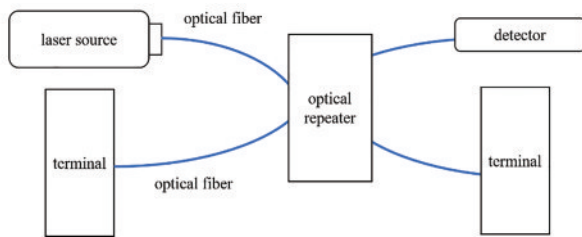


图 9 激光功率计在光纤通信中的应用

Fig. 9 Application of laser power meter in optical fiber communication

目前的光中继器一般使用光电二极管作为激光功率计,因为其响应速度快以及波长检测范围覆盖通信波段等特性,在实际工作中应用十分广泛。高精度和大信息量的光纤通信也对光电二极管的分辨力、灵敏度和响应时间等性能参数提出了更高的要求。

3.2 激光加工

在利用激光烧蚀现象进行激光加工的过程中,激光的功率或单脉冲能量决定了加工的结果,故激光的功率或单脉冲能量是一个必须准确测得的物理量^[63]。在涉及到激光加工的应用中,使用的激光功率一般都比较,各种形式的大功率激光测量方案,比如流水式、积分球等,都是为了满足大功率激光的测量要求。

在一些高精度激光焊接和烧蚀的应用中,需要实时监测激光的功率以便进行调节。目前应用比较广泛的方法是使用分光比为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 的分光镜进行分光,这种方式的缺点是在分光过程中,分光镜会难以避免地受热膨胀,造成分光比和光路方向的误差。近几年来,受到广泛关注的光致动力学传感,由于能在不吸收激光的情况下测量较大的功

率,将会成为一种激光加工在线功率测量的优选解决方案。

该测量方案在测量较大的激光功率时,很难保证测量的绝对精度,无法得到激光功率比较微小的波动,然而激光功率随时间的微小变化会对被加工工件的质量造成比较大的影响,因此在扩大测量范围的同时提高测量精度是激光功率计的一个重要研究方向。

3.3 生物医疗

激光疗法指的是使用激光束对人体组织或者病变区域进行照射、切割、灼烧或破坏的一种治疗手段,常见的领域包括静脉曲张的治疗、角膜手术、视网膜脱落手术、前列腺手术、移除肾结石、切除肿瘤,以及牙周和龋齿的病变处理等,其中一个比较重要的应用是用激光进行龋齿的预防。激光预防龋齿的原理比较复杂,包括激光热效应杀菌、改变牙齿釉质结构和影响釉质渗透性等^[72]。激光单脉冲能量是该过程中的一个重要指标,使用激光能量计可以对激光脉冲能量进行评估,以便在不伤害患者的情况下获得更好的治疗效果。

3.4 现代国防

激光由于其高亮度、单色性和方向性好等特点,在国防领域获得了广泛的应用,包括激光测距、激光雷达、激光制导和激光武器等,其中很多应用都离不开激光功率计。早期的激光测距使用的是脉冲测距法,根据从被测物体反射的脉冲激光的返回时间来判断物体的距离,因此接收端激光功率计的响应时间能够直接影响测量结果的准确度。瑞利散射激光雷达是激光雷达中的一种,有探测灵敏度高和时间空间分辨力强等优点,但因容易受到气溶胶的干扰,一般在 30 km 以上的高空进行工作。这种激光雷达的一个重要测量参数是回光功率,因此测量端激光功率计的分辨力越高,雷达的时空分辨力就越高。由于散射光强度一般不是很高,故可以应用分辨力较高的激光功率计,如光电二极管式和热释电式传感器。

3.5 光纤传感

布里渊光时域反射(BOTDR)技术可以用于测量光纤中的熔接点、折射率变化、位移以及温度等参数。其基本原理是一束激光打入光纤之后,在激光源的同侧接收光纤传光过程中的背向布里渊散射光,使其与参考臂中的光相互干涉(图 10)^[73]。从干涉信号中提取出差频信号,若自发布里渊散射的

功率为 P_B , 参考光功率为 P_L , 根据相干检测的原理, 可知相干检测所获得的差频电信号的交流分量为

$$\delta = 2\sqrt{P_L P_B \cos(2\pi\Delta\nu t)}, \quad (4)$$

式中 $\Delta\nu$ 为自发布里渊散射光与参考光的频率差。此时探测器能探测到的信号由两束光的光功率决

定。因此, 参考臂光功率的测量精度会直接影响 BOTDR 的测量结果。参考臂输出功率的反馈补偿结构能够比较好地解决这一问题。最直接的方法是提升传感器的精度和响应速度, 以确保测量结果的可靠性。

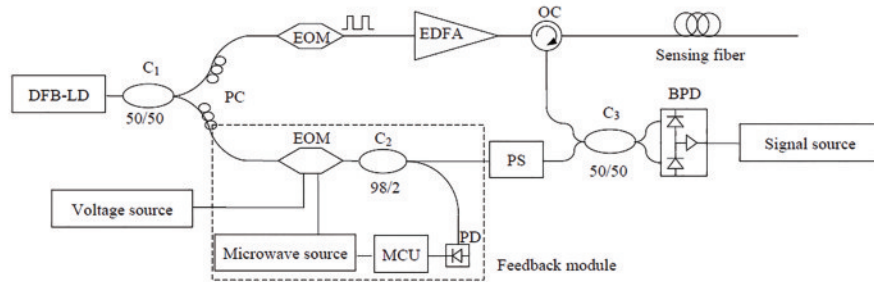


图 10 BOTDR 系统示意图^[73]
Fig. 10 Diagram of BOTDR system^[73]

3.6 电光元件

电光 Q 开关(Q-switch)是超短脉冲激光器的重要组成部分, 可以通过阻断光在谐振腔内的反射通路来使激光器进入通光和截止两种状态。电光 Q 开关的消光比是一个重要的参数, 其定义为

$$M = I_0 / I_{\lambda/2}, \quad (5)$$

式中 M 为消光比, I_0 为未加半波电压的透射光强, $I_{\lambda/2}$ 为晶体加上半波电压后的透射光强^[74]。由于光强和功率成正比, 故可以通过测量功率来计算 Q 开关的消光比, 见图 11。

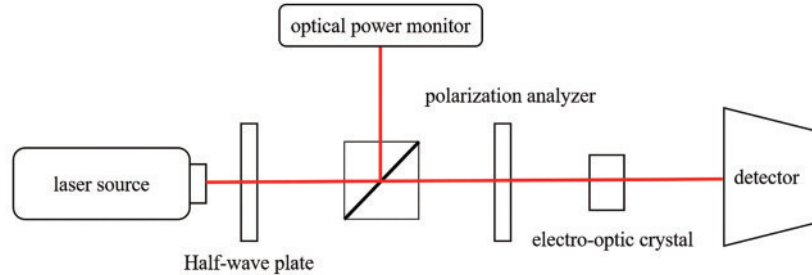


图 11 Q-switch 消光比测量系统示意图
Fig. 11 Q-switch extinction ratio measuring system

除上述应用之外, 在科学研究中, 激光功率计还可以用来确定光电二极管的量子效率^[66]、测量微波的频率^[75]、测量皮秒脉冲激光的脉冲宽度^[76], 以及进行引力波测量仪的校准^[66]。此外, 激光功率计还可以应用在其他很多需要激光作为光源的实验场合^[77-105]。

4 高精度激光功率测量面临的挑战

对激光功率计的评价主要是对传感器基本参数的评价, 包括灵敏度、时间分辨力、功率分辨力、功率测量范围、波长测量范围等。针对不同类型的激光功率计有不同的侧重, 如: 对流水式等大功率激光测量方案, 功率测量值的上限最为关键; 对常

常适用于微弱光信号测量和脉冲能量测量的热释电型功率计来说, 功率测量的灵敏度和响应时间更加重要。随着激光功率检测技术的发展, 现在的激光功率计研究已经不再是以制作出能够投入使用的光功率计为目标, 而是朝向高精度测量发展, 使其能适应激光功率检测的高精度要求。近几年来, 外场激光功率测量已经成为了一个热门的研究方向^[106-107]。实际应用中由于杂散光的干扰, 实现高精度的外场激光功率测量会比较困难, 需要使用共模抑制或相干采样等方法对信号进行处理。此外, 一些激光传感技术的发展, 也使得微弱激光信号的测量成为一个重要的研究方向^[108]。在测量 mW 至 pW 级的微弱激光时, 光探头与光纤的功率耦合、寄生

电容等多种因素都会对测量结果造成很大的影响。在一些特殊应用中,还需要激光功率计有比较好的抗电磁干扰能力,以适应本身带有较强电磁场的工作环境^[109]。近些年来一些新的校准方法的出现,也使激光功率计测量精度有了更大的上升空间^[110-113]。

综合上述分析可知,高精度光功率测量目前面临的主要挑战如下:

- 1) 在降低测量不确定度的同时提升测量范围,包括功率以及波长的范围;
- 2) 在激光加工等需要进行功率调整的场合,如何实现光功率的实时监测;
- 3) 如何提升光功率计的抗干扰能力,包括杂散光和电磁噪声的干扰;
- 4) 基于热效应的光功率计需要溯源到更高精度的功率计。

5 结论与展望

激光功率计广泛应用于科学研究及生产实际中的各个领域。随着高能激光的应用和超快激光的出现,传统的激光功率计已经难以满足新的激光应用对功率测量的需求,在灵敏度、响应速度、抗干扰能力等方面都亟待提升。除了低温辐射计之外,其他应用更加广泛的激光功率计都难以达到精密测量的要求,导致其他需要激光功率计作为基础的应用发展较为滞后。相信随着仪器科学的研发,未来我国在高精度激光功率计领域会取得长足的进步,并推动激光相关产业的发展。

参 考 文 献

- [1] Webb J H. Stimulated emission and Bose-Einstein statistics[J]. American Journal of Physics, 1972, 40(6): 850-853.
- [2] Chen J Q. Maiman and the world's first laser[J]. Modern Physics, 1994, 6(1): 18-20.
陈敬全. 梅曼和世界上第一台激光器[J]. 现代物理知识, 1994, 6(1): 18-20.
- [3] Zhou Z G, Zhang K S, Zhou J H, et al. Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 173-178.
- [4] Guo W, Wang H, Peng P, et al. Effect of laser shock processing on oxidation resistance of laser additive manufactured Ti₆Al₄V titanium alloy [J]. Corrosion Science, 2020, 170: 108655.
- [5] Jiang D S, He W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(4): 420-430.
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [6] Zuo T C, Shi D Y, Chen K, et al. Advantage of the laser processing technology and the application in industry[J]. Laser Journal, 1999, 20(4): 8-9.
左铁钊, 施定远, 陈铠, 等. 激光加工技术的优势及在工业生产中的应用[J]. 激光杂志, 1999, 20(4): 8-9.
- [7] Fu Z M, Li D M. Application and development trend of laser processing technology in construction machinery manufacturing [J]. MW Metal Forming, 2020(6): 10-13.
傅中明, 李德明. 激光加工技术在工程机械制造中的应用与发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2020(6): 10-13.
- [8] Liu X F, Zhang Z G. Application research of laser cutting technology in sieve plate processing [J]. Technology Innovation and Application, 2020(18): 119-120.
刘险峰, 张志刚. 激光切割技术在筛板加工中的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2020(18): 119-120.
- [9] Meng Z S, Zhao R. Review on the key technical problems of the application of laser scanning [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2009, 32(6): 60-62.
孟昭山, 赵锐. 激光扫描应用的关键技术问题综述 [J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(6): 60-62.
- [10] Maiman T H, Hoskins R H, D'Haenens I J, et al. Stimulated optical emission in fluorescent solids. II. Spectroscopy and stimulated emission in ruby [J]. Physical Review, 1961, 123(4): 1151.
- [11] Li T Y, Sims S D. A calorimeter for energy measurements of optical masers [J]. Applied Optics, 1962, 1(3): 325-328.
- [12] Martin J E, Fox N P, Key P J, et al. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements [J]. Metrologia, 1985, 21(3): 147-155.
- [13] Huang Z G, Li Q K. Laser power meter with fast time response at full spectral range [J]. Chinese Journal of Lasers, 1982, 9(12): 786-788.
黄振国, 李前康. 全波段快响应激光功率计 [J]. 中国激光, 1982, 9(12): 786-788.
- [14] West E D, Churney K L. Theory of isoperibol calorimetry for laser power and energy measurements [J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(6): 2705-2712.

- [15] Soni R K, Mandloie V K, Pote M B, et al. Spinning cone water film power meter for high-power CO₂ lasers[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(1): 196-201.
- [16] Faaland R W, Naiman M L. Laser power measurement standards: a comparison of two scales [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1987, IM-36(2): 455-457.
- [17] Yuan R. AY2492 high sensitivity optical power meter [J]. Application of Electronic Technique, 1985, 11(4): 28-33.
原荣. AY2492型高灵敏度光功率计[J]. 电子技术应用, 1985, 11(4): 28-33.
- [18] Zhang X, Chen T, Jin C F, et al. Design and development of portable light source and power meter system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 212301.
张翔, 陈涛, 金操帆, 等. 便携式光源、光功率计系统开发与设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 212301.
- [19] Yi H J, Zhuang L, Tan H M, et al. The study of photoelectric power meter for measuring W-class laser[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(7): 590-592.
伊红晶, 壮凌, 檀慧明, 等. 测量瓦级激光的光电型功率计的研制[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 590-592.
- [20] Zhang X J, Kang C, Sun J H, et al. Multifunctional optical power meter [J]. Physics Experimentation, 2015, 35(5): 34-36, 42.
张晓峻, 康崇, 孙晶华, 等. 多功能光功率计研制[J]. 物理实验, 2015, 35(5): 34-36, 42.
- [21] Yang Y W. Research on capacitance characteristics of high speed PIN photodetector in optical communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019.
杨彦伟. 光通信中高速PIN光探测器的电容特性研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [22] Chen B J, Zhao Q T. Performance test for silicon PIN photodiode at zero bias[J]. Semiconductor Optoelectronics, 1980, 1(1): 43-52, 63.
陈炳甲, 赵庆添. 硅PIN光电二极管零偏压使用的性能测试[J]. 半导体光电, 1980, 1(1): 43-52, 63.
- [23] Zhou Z, Yang J, Qin Y, et al. Design of optical power meter based on PIN photodiode[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(6): 43-45.
周真, 杨军, 秦勇, 等. 基于PIN光电二极管的光功率计[J]. 仪表技术与传感器, 2013(6): 43-45.
- [24] Liu Y, Hao D Y, Lü Y, et al. Power measurement technique of low SNR Laser signal based on charge integration sampling [J]. Laser Journal, 2018, 39(10): 24-27.
刘洋, 郝东阳, 吕勇, 等. 基于电荷积分采样技术的低信噪比激光功率测量技术研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(10): 24-27.
- [25] Liu H A. Optical power detector based on side polished fiber and MoS₂ or As₂Se₃ films[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
刘华安. 基于二硫化钼或硒化砷覆层及侧边抛磨光纤的全光功率探测器[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- [26] Zeng X G, Xia J, Hu T H, et al. Laser power measurement systems based on lock-in amplifiers and Lab-VIEW [J]. Laser Technology, 2015, 39(3): 295-299.
曾贤贵, 夏晶, 胡同欢, 等. 基于锁相放大器和Lab-VIEW的激光功率测量系统[J]. 激光技术, 2015, 39(3): 295-299.
- [27] Liao P, Xu W J. Optical power meter design based on weak signal detection[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(7): 32-35.
廖平, 许伟坚. 基于微弱光信号检测的光功率计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(7): 32-35.
- [28] Xu F, Gao G H. Overview of laser power meter design [J]. Medical Equipment Journal, 1998, 19(5): 19-21.
徐锋, 高光煌. 激光功率计设计概述[J]. 医疗卫生装备, 1998, 19(5): 19-21.
- [29] Sun C, Han S L, Yan J S, et al. Design of a high sensitivity near infrared fiber-optical power meter [J]. Infrared, 2018, 39(4): 22-26.
孙超, 韩顺利, 闫继送, 等. 一种高灵敏度近红外光纤光功率计的设计[J]. 红外, 2018, 39(4): 22-26.
- [30] Gunn S R. Calorimetric measurements of laser energy and power[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1973, 6(2): 105-114.
- [31] Xie Y J, Duan L H, Ji Y F, et al. Development of calorimetric detector for high energy laser energy measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S3): 80-84.
谢永杰, 段刘华, 戢运峰, 等. 高能激光量热式能量探头的研制[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S3): 80-84.
- [32] Yu S, Li G P, Sang P, et al. Bulk absorption laser calorimeter operating in non-standard environment [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4): 646-649.

- 于帅, 黎高平, 桑鹏, 等. 工作于非标准环境下体吸收型激光能量计的研制[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 646-649.
- [33] Jiang G G, Xue L, Zhu T, et al. Design of high precision laser power meter based on LPC1754[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(3): 55-58. 蒋刚刚, 薛琳, 朱彤, 等. 基于 LPC1754 的高精度激光功率计设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(3): 55-58.
- [34] Sui C H, Xu Z L, Xu D Y, et al. A research of high-power optical power meter based on Wi-Fi communications[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(1): 155-160. 隋成华, 徐之力, 徐丹阳, 等. 基于 Wi-Fi 通讯的大功率光功率计的研制[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 155-160.
- [35] Li J N, Bao A D, Qin L, et al. Laser power measurement method based on high performance black silicon MEMS thermopile power meter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 112501. 李竞男, 鲍爱达, 秦丽, 等. 基于高性能黑硅 MEMS 热电堆的激光功率测试方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 112501.
- [36] Zhang D, Gao J Q, Xia J W, et al. Analysis of unstable factors in the beam splitting ratio measurement with thermoelectric laser power sensors[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2018, 45(4): 39-41, 45. 张东, 高建强, 夏俊雯, 等. 热电型激光功率计监测比测量过程中的不稳定因素分析[J]. 上海计量测试, 2018, 45(4): 39-41, 45.
- [37] Cheng K, Kong W, Guo B, et al. Heat exchanger optical power meter based on electric heating[J]. Optical Communication Technology, 2016, 40(4): 36-37. 程康, 孔炜, 郭波, 等. 一种基于电加热式的量热型光功率计[J]. 光通信技术, 2016, 40(4): 36-37.
- [38] Jirmann J. A simple pyroelectric power meter for the FIR range[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1984, 5(5): 637-642.
- [39] Hammerich M, Olafsson A. A versatile, low-cost pyroelectric laser power monitor for the 1 mW to 50 W range[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21(1): 80-83.
- [40] Satapathy S, Wadhawan V K. Fabrication of pyroelectric laser-energy meters and their characterization using Nd:YAG laser of variable pulse-width[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 121(2): 576-583.
- [41] Envall J, Kärhä P, Ikonen E, et al. Measurements of fibre optic power using photodiodes with and without an integrating sphere[J]. Metrologia, 2004, 41(4): 353-358.
- [42] Hu Q, Wang M, Xia Z Q, et al. Design and realization of UV radiation optical power measurement system based on ARM[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(13): 124-128. 瑚琦, 汪敏, 夏志迁, 等. 基于 ARM 的紫外辐射光功率测量系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(13): 124-128.
- [43] Wu Y, Li G P, Yu S, et al. Measurement method of thermal loss coefficient of calorimetric laser energy meter[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 398-402. 吴遥, 黎高平, 于帅, 等. 量热式激光能量计热损失系数测定方法的研究[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 398-402.
- [44] Gao Z Z, Wang Z C, Piao D Z, et al. The realization of the basic unit for photometry with the electrically calibrated radiometer[J]. Acta Metrologica Sinica, 1983(2): 81-85. 高执中, 王振常, 朴大植, 等. 用电校准辐射计复现发光强度单位—坎德拉[J]. 计量学报, 1983(2): 81-85.
- [45] Gan H Y, He Y W, Liu N, et al. Absolute cryogenic radiometer for high accuracy optical radiant power measurement in a wide spectral range[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(9): 091201.
- [46] Livigni D J, Cromer C L, Scott T R, et al. Thermal characterization of a cryogenic radiometer and comparison with a laser calorimeter[J]. Metrologia, 1998, 35(6): 819-827.
- [47] Li Z Q, Lü Z. The present state of cryogenic absolute radiometer[J]. Advanced Measurement and Laboratory Management, 1993, 1(6): 13-17. 李在清, 吕正. 低温绝对辐射计的发展现状[J]. 现代测量与实验室管理, 1993, 1(6): 13-17.
- [48] 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.
- [49] Wei J F, Zhang K, He J Z, et al. Temperature measurement technology research for water-flowing calorimeters[J]. China Measurement & Test, 2009, 35(1): 46-49.

- 魏继锋, 张凯, 何均章, 等. 流水式量热计温度测量技术研究[J]. 中国测试, 2009, 35(1): 46-49.
- [50] Liu W P, Duan L H, Ji Y F, et al. Modeling of temperature response of water-cycled laser calorimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1494-1498.
- 刘卫平, 段刘华, 戢运峰, 等. 水循环式激光能量计温度响应建模[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1494-1498.
- [51] Optics Department of National Institute of Metrology. Development of laser high power measurement standard[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1978, 5(3): 21-26.
- 中国计量科学研究院光学室. 激光大功率计量标准的研制[J]. 中国激光, 1978, 5(3): 21-26.
- [52] 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.
- [53] Hsueh Y C, Yang L F, Webb K J, et al. Enhanced optical pressure with asymmetric cavities[J]. *Physical Review B*, 2019, 99(4): 045437.
- [54] Požar T, Laloš J, Babnik A, et al. Isolated detection of elastic waves driven by the momentum of light [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3340.
- [55] Chu Y J L, Jansson E M, Swartzlander G A, et al. Measurements of radiation pressure owing to the grating momentum [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(6): 063903.
- [56] Manske E, Fröhlich T, Vasilyan S, et al. Photon momentum induced precision small forces: a static and dynamic check [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(10): 105004.
- [57] Brevik I. Remarks on the Abraham-Minkowski problem, in relation to recent radiation pressure experiments [J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2019, 34(28): 1941003.
- [58] Ruppin R. Scattering of electromagnetic radiation by a perfect electromagnetic conductor cylinder [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2006, 20(13): 1853-1860.
- [59] Waddell M B, Chau K J. Simulations of radiation pressure experiments narrow down the energy and momentum of light in matter [J]. *Reports on Progress in Physics: Physical Society*, 2015, 78(12): 122401.
- [60] Vasilyan S, Fröhlich T, Manske E, et al. 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.
- [61] Wang H J. Momentum density and momentum flux density of electromagnetic fields in the media [J]. *Journal of Shangqiu Normal University*, 2013, 29(12): 39-41.
- 王洪吉. 介质中电磁场的动量密度和动量流密度 [J]. 商丘师范学院学报, 2013, 29(12): 39-41.
- [62] 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.
- [63] Ryger I, Glimpse A B A, Williams P, et al. Micromachined force scale for optical power measurement by radiation pressure sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(19): 7941-7948.
- [64] Pinot P, Silvestri Z. Optical power meter using radiation pressure measurement [J]. *Measurement*, 2019, 131: 109-119.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] Li Z, Gao S, Brand U, et al. Traceable laser power measurement using a micro-machined force sensor with sub-piconewton resolution [C] // 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSensors XXXIII), June 23-27, 2019, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 1603-1606.
- [68] Tian J, Deng N P, Wu C X, et al. Study on laser power measurement method under different orders of magnitude and research [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2017, 44(12): 41-42, 46.
- 田健, 邓念平, 吴传昕, 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, 46.
- [69] Gao X Y, Zhou D H, Zhou S, et al. Transformation theory of light power waveform by an integrating sphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4): 465-469.
- 高学燕, 周殿华, 周山, 等. 积分球的光功率波形变

- 换理论[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 465-469.
- [70] Lu Y D, Shi H M, Qi X, et al. Integrated sphere application in the field of powerful laser energy measurement [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2000, 12(S1): 106-108.
陆耀东, 史红民, 齐学, 等. 积分球技术在高能激光能量测量中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(S1): 106-108.
- [71] Sun Z W, Li W, Sun T K, et al. A water-cooled integrating sphere laser power meter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1980, 1(4): 102-106.
孙祉伟, 李伟, 孙同坤, 等. 水冷式积分球功率计 [J]. 仪器仪表学报, 1980, 1(4): 102-106.
- [72] He W X, Liu N N, He X Y, et al. The application of laser in endodontics [J]. Chinese Journal of Practical Stomatology, 2015, 8(4): 198-202.
何文喜, 刘宁宁, 何欣遥, 等. 激光在牙体牙髓病治疗中的应用[J]. 中国实用口腔科杂志, 2015, 8(4): 198-202.
- [73] Bi W H, Li J Y, Yang X P, et al. The control of reference light power stability in microwave electro-optic modulation BOTDR system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(5): 52-57.
毕卫红, 李敬阳, 杨希鹏, 等. 微波电光调制 BOTDR 系统中参考光功率稳定控制[J]. 光电工程, 2015, 42(5): 52-57.
- [74] Liu Y J, Na Q X, Zhang Y X, et al. Measurement of extinction ratio of electro-optical Q-switcher and analysis of impact factors[J]. Laser Journal, 2016, 37(3): 79-83.
刘溢嘉, 纳全鑫, 张艺轩, 等. 电光 Q 开关消光比的测量以及影响因素分析[J]. 激光杂志, 2016, 37(3): 79-83.
- [75] Chi H, Zou X H, Yao J P, et al. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(14): 1249-1251.
- [76] Korai U A, Wang Z F, Lacava C, et al. Technique for the measurement of picosecond optical pulses using a non-linear fiber loop mirror and an optical power meter [J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6377-6388.
- [77] Bazkir Ö, Cenk S, Mahmoud K, et al. Traceability of laser pulse energy measurements by linking reference standards for CW and pulsed measurements [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 972: 012013.
- [78] Li S S, Quan Z, Lu Y Y, et al. Research and development of multi-rate error and optical power integrated detection system [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(1): 112-116.
李珊珊, 全智, 卢媛媛, 等. 多速率误码和光功率集成检测系统的研究与开发[J]. 仪表技术与传感器, 2020(1): 112-116.
- [79] Neumann B, Wright S. Fast high power laser power measurement [J]. Photonics Russia, 2018(1): 58-64.
- [80] Schmailzl A, Käsbauser J, Martan J, et al. Measurement of core temperature through semi-transparent polyamide 6 using scanner-integrated pyrometer in laser welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 146: 118814.
- [81] Huang F J. The research on process of three dimensional laser cutting applied in auto-body panel manufacturing [D]. Changsha: Hunan University, 2008.
黄丰杰. 车身覆盖件的三维激光切割工艺研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [82] Shi W Y, Dong L. Mid-IR laser far-field power measurement system based on imaging method [J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(2): 11-13.
时文远, 董亮. 成像法中波红外激光远场功率测量系统[J]. 光电技术应用, 2015, 30(2): 11-13.
- [83] Sun Z H, Wang W Y, Liu H, et al. Power balance measurement technique of multi-beam laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(6): 1493-1497.
孙志红, 王文义, 刘华, 等. 多路激光功率平衡测量技术[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1493-1497.
- [84] Li H. Based on OTDR and light power test of fiber optic fault monitoring application [J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(5): 1357-1359.
黎华. 基于 OTDR 和光功率测试的光纤故障监测应用方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1357-1359.
- [85] Su B X, Chen X J, Wu R Q, et al. Measurement and research of optical loss in optical communication [J]. Journal of Changchun Normal University, 2017, 36(12): 19-24.
苏宝玺, 陈小君, 吴荣琴, 等. 基于光通信中光损耗的测量与研究 [J]. 长春师范大学学报, 2017, 36(12): 19-24.
- [86] Zhang X H, Wang L T, Fang N, et al. Study on power frequency electric-field measurements based

- on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020603.
- 张旭辉, 王陆唐, 方捻, 等. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020603.
- [87] Zhong R T, Qin Y X, Tang X H, et al. Influence of micro-fluctuation of laser power to processing quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2638-2641.
- 钟如涛, 秦应雄, 唐霞辉, 等. 激光功率的微观波动对加工质量的影响[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2638-2641.
- [88] Lu H Z, Tu M L, Ji C D, et al. Micro displacement measurement method based on laser focus deviation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(2): 461-466.
- 陆惠宗, 屠明亮, 纪晨东, 等. 激光聚焦偏移测量微小位移方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(2): 461-466.
- [89] Fu K, Sun X Q, Fu D B, et al. Influence of wavelength sensitivity of optical power meter for communication on measurement results[J]. *Measurement Technique*, 2018(12): 3-6.
- 付康, 孙小强, 傅栋博, 等. 通信用光功率计波长敏感性对测量结果的影响[J]. *计量技术*, 2018(12): 3-6.
- [90] Sun X Q, Fu D B, Li R, et al. Research on calibration method of burst optical power meter in passive optical network[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2016, 37(5): 480-483.
- 孙小强, 傅栋博, 李然, 等. 无源光网络中突发光功率计校准方法的研究[J]. *计量学报*, 2016, 37(5): 480-483.
- [91] Huang S P. A new method for simultaneously measuring waist position and waist radius of Gaussian beam[J]. *Physics and Engineering*, 2017, 27(4): 30-33.
- 黄水平. 一种同时测量高斯光束束腰位置和半径的新方法[J]. *物理与工程*, 2017, 27(4): 30-33.
- [92] Scaggs M, Haas G. M-squared laser measurement as simple as measuring laser power[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11266: 112661A.
- [93] Scaggs M, Haas G. Self-calibrating, real-time M-square measurement system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10090: 100901Q.
- [94] Yuan W, Wang J T, Song H W, et al. Full-field deformation and temperature measurement for CW laser irradiated structures[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 110: 244-252.
- [95] Hu Y B, Li J J, Xia M P, et al. Measurement and correction of linearity of photon counters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(6): 0604001.
- 胡友勃, 李健军, 夏茂鹏, 等. 光子计数器的线性测量和修正[J]. *光子学报*, 2016, 45(6): 0604001.
- [96] Yuan R, Qu Z M, Ma Z Y, et al. Development report of low light power meter for fiber optics application[J]. *Laser communication*. 1980, 4(3): 1-7.
- 原荣, 区仲明, 马芝云, 等. 纤维光学应用的微光功率计研制报告[J]. *激光通信*, 1980, 4(3): 1-7.
- [97] Zhang P, Dong J, Han S L, et al. High responsivity terahertz detector based on Seebeck effect [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(8): 761-765.
- 张鹏, 董杰, 韩顺利, 等. 基于塞贝克效应的高响应度太赫兹探测器的研究[J]. *红外技术*, 2017, 39(8): 761-765.
- [98] Li G P, Wang L, Yang Z J, et al. Study on the measurement of long pulse high power laser energy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(9): 1111-1114.
- 黎高平, 王雷, 杨照金, 等. 长脉冲高能激光能量测试技术的研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(9): 1111-1114.
- [99] Gao T T, Xu Z W, Fang F Z, et al. High performance surface-enhanced Raman scattering substrates of Si-based Au film developed by focused ion beam nanofabrication [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2012, 7(1): 1-8.
- [100] Fang F Z, Cheng Y, Zhang X D, et al. Design of freeform optics [J]. *Advanced Optical Technologies*, 2013, 2(5/6): 445-453.
- [101] Fang F Z, Zhang X D, Weckenmann A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics [J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(2): 823-846.
- [102] Fang F Z. Fundamental study and progress of nanomanufacturing[J]. *China Basic Science*, 2014, 16(5): 9-15.
- 房丰洲. 纳米制造基础研究的相关进展[J]. *中国基础科学*, 2014, 16(5): 9-15.
- [103] Dong H W, Guo R M, Cui W C, et al. Cavity ring-down spectroscopy based on folded cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0311001.
- 董贺伟, 郭瑞民, 崔文超, 等. 基于折叠腔的光腔衰荡光谱技术研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0311001.
- [104] He M Y, Li M, Yuan S, et al. High-power

- femtosecond self-similar fiber amplification system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0308001.
- 贺明洋, 李敏, 袁帅, 等. 高功率飞秒自相似光纤激光放大系统[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0308001.
- [105] Wang L Z, Li L J, Tong L M, et al. Optical microfibers and their applications in mode-locked fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126011.
- 王利镇, 李林军, 童利民, 等. 微纳光纤及其锁模激光应用[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126011.
- [106] Jiao B G, Liu Y, Lü Y, et al. Research of field laser power measurement based on correlated double sampling technique [J]. Tool Engineering, 2017, 51(9): 125-128.
- 焦保刚, 刘洋, 吕勇, 等. 基于相关双采样技术的外场激光功率测量研究[J]. 工具技术, 2017, 51(9): 125-128.
- [107] Yang Y P, Hou M, Li G P, et al. Pyroelectric laser energy meter used in non-regular ambient environment [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(4): 752-755.
- 杨治平, 侯民, 黎高平, 等. 适用于非常规工作环境中热释电型激光能量计的研制 [J]. 应用光学, 2012, 33(4): 752-755.
- [108] Xiang L. Discussion on the detecting method and technology of weak laser power meter [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2017(3): 11-14.
- 向莉. 浅议微弱激光功率计的检测方法和技术 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2017(3): 11-14.
- [109] Wang Q, Li S, Su Z W, et al. Research on EMC anti-interference of laser power meter [J]. China Medical Devices, 2015, 30(9): 31-33.
- 王权, 李澍, 苏宗文, 等. 激光功率计电磁兼容抗扰度研究 [J]. 中国医疗设备, 2015, 30(9): 31-33.
- [110] Bai X. Calibration technology and application of laser power meter [J]. The Journal of Engineering, 2019(23): 8806-8811.
- [111] Vayshenker I, Livigni D J, Li X, et al. Optical fiber power meter comparison between NIST and NIM [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2010, 115(6): 433-436.
- [112] Vayshenker I, Lehman J H, Livigni D J, et al. Trilateral optical powermeter comparison between NIST, NMIJ/AIST, and METAS [J]. Applied Optics, 2007, 46(5): 643.
- [113] Cui L, Jia Y Q, Zhang J L, et al. Research on a new calibration method of optical power meter [J]. Measurement Technique, 2019(3): 14-16, 25.
- 崔磊, 贾亚青, 张建亮, 等. 一种新型光功率计校准方法的研究 [J]. 计量技术, 2019(3): 14-16, 25.