

积分球技术在高能激光能量测量中的应用

陆耀东, 史红民, 齐学, 王昊, 高和平

(北京光电技术研究所, 北京 648 信箱, 100010)

摘要: 介绍了一种采用积分球技术对高能激光能量测试的有效方法, 给出了其工作原理、设计要求和误差分析。

关键词: 激光能量; 测量; 积分球技术

中图分类号: TN247

文献标识码: A

在高能激光研究过程中需要快速准确地对激光输出能量进行测量, 以了解各环节对器件性能的影响, 从而有针对性地做进一步的研究和改进工作, 以提高器件的性能。

传统的激光能量测量仪器是基于量热型原理^[1], 用黑色吸收体将入射光尽可能高效率地转化为热。由于吸收体材料确定以后, 其温升与入射激光能量成正比, 测量吸收体的温升就可实现激光能量的测量。这种基于直接量热原理的测量仪器在中小激光能量测量中已经是成熟技术。目前这种仪器的主要缺点是抗激光破坏阈值低, 响应速度慢, 恢复时间长, 不适合用于高能激光能量的测量。采用积分球技术, 配合与激光器谐振腔腔镜同种材料制作的全反射凸面受光镜, 既可以解决抗激光破坏问题, 又能将能量极为集中的强激光束大幅度地衰减到常规能量探测器可以承受的水平。这种能量计不仅能有效地对高能激光能量进行测试, 而且响应速度快, 恢复时间短, 是一种实用方便的高能激光能量测试仪器。

1 基本工作原理

积分球的基本结构是一个内部空心的球壳。在球壳内表面均匀地喷涂着一定厚度的朗伯漫反射涂层。对于半径为 R 的积分球, 球壁涂覆的朗伯漫射层的反射系数为 ρ , 射入积分球的辐射通量为 ϕ , 那么, 球壳上任意一点的辐照度为:

$$E = E_0 + E_1 + E_2 + \dots = E_0 + \sum_{i=1}^{\infty} E_i \quad (1)$$

式中: E 为积分球壳表面上任意一点的辐照度, E_0 为入射通量直接照射形成的辐照度, E_i 为入射通量在球壳内表面经过 i 次反射后在被考察点形成的辐照度。

根据经典的积分球理论^[2]可以证明:

$$\sum_{i=1}^{\infty} E_i = \frac{\phi}{4\pi R^2} \frac{\rho}{1-\rho} \quad (2)$$

由(1)(2)式可得:

$$E = E_0 + \frac{\phi}{4\pi R^2} \frac{\rho}{1-\rho} \quad (3)$$

式中第一项 E_0 为入射通量直接照射形成的辐照度, 随入射辐射的分布情况而变化, 但第二项却只随入射通量 ϕ 的大小而变化, 与入射辐射的分布无关。因此, 如果在积分球表面, 使被考察点不受入射光直接照射的影响, 即上式中 $E_0=0$, 则有

$$E = \frac{\phi}{4\pi R^2} \frac{\rho}{1-\rho} \quad (4)$$

对于一定反射系数 ρ 的涂层、一定半径 R 的球壳, 被考察点的辐照度 E 与球壳上的具体位置无关,

• 收稿日期: 2000-08-10; 修订日期: 2000-10-20

作者简介: 陆耀东 (1958-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 高能激光功率、能量和光束质量等参数的测试与监测技术研究。

而且与入射辐射通量 ϕ 成线性关系。如果球壳上开一个半径为 r 的采样小孔, 相对于球壳来说, 小孔面积很小, 通过小孔的辐射通量 ϕ_r 为球面上任一点的辐照度 E 与小孔面积的乘积:

$$\phi_r = E \cdot \pi r^2 = \frac{\pi r^2 \phi}{4\pi R^2} \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (5)$$

由于 ρ 和 R 是球的特征常数, 因此, 通过小孔的辐射通量与入射光通量成正比。也就是说, 在开孔处测得的激光能量与积分球的人射激光总能量成线性关系。根据这一原理, 我们可以在开孔处放置能量探测器, 通过测量此处的激光能量得出积分球的总入射能量。

2 结构与考虑

根据上述积分球理论, 用于高能激光能量测量的积分球探测器结构如图 1 所示。

由于入射激光辐射很强, 不能让人射激光束直接照射到积分球的球壁上, 否则会将积分球涂层乃至壳体损伤。考虑到被测高能激光为环形光束输出的特点, 在激光束照射到积分球内表面之前, 应该先用凸面反射扩束镜将光束扩展开来, 使激光束照到球壳时的功率密度和能量密度降低。

为了达到足够的衰减量, 要求积分球有足够大的内表面积, 采样孔要足够小。应根据被测对象的能量水平选择不同尺寸的积分球。

激光入射进积分球壳后, 全部入射光能最终都要被球壳吸收掉, 转化成热能, 表现为积分球壳温度的上升。因此, 为了避免球壳温度上升过高, 要求它有足够大的热容量。

在积分球壳内表面镀有漫射层, 必须确保该漫射层是良好的朗伯漫射体。否则, 就会动摇积分球的理论基础。图 2 是标准朗伯漫射体的漫射分布, 其中箭头表示光的方向, 线段长度表示该方向的光强度。对于理想的朗伯漫射, 其漫反射光在空间呈球形分布。采用图 3 装置可以对涂层的漫射特性进行测试分析。一束激光以一定角度入射到被测样品表面, 在 180 度范围旋转探测器 D, 测量不同方向的漫射光强大小, 并在极坐标上画出光强分布图, 可以了解漫射体的实际漫射效果。以此为根据, 选择合适的漫射材料与工艺条件。此外, 还要求涂层具有稳定的物理化学性能。

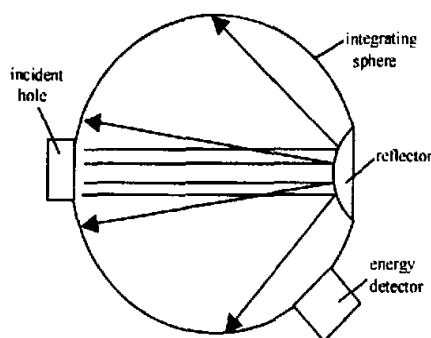


Fig. 1 Schematic of integrating sphere energy test system

图 1 积分球高能激光探测器结构示意图

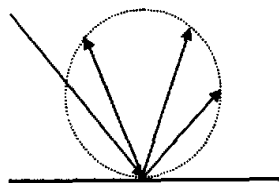


Fig. 2 Light intensity distribution for normal diffuser

图 2 标准漫射体的漫射光强分布

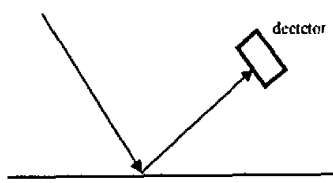


Fig. 3 Diffuse light intensity test system

图 3 漫射光强分布测试装置

在扩束镜设计中要同时考虑第一次反射光不从入口逸出, 尽可能将能量集中的入射激光束散开, 能量传感器上不受入射激光的直接照射等因素。

图 1 中的能量探测器实际上是一种热卡计。其吸收体设计为绝热状态, 它把吸收的激光能量转化为热, 表现为吸收体温度升高。由于激光吸收体不可能真正地绝热, 在接收激光能量的同时它也在向外界散热, 这导致热电堆实际输出的最大值并不表征着全部的激光束能量。在测量持续时间较长的激光脉冲能量时, 这个问题分外突出。因此要选用吸收体的绝热性能好的能量探测器。从能量探测器的性能指标上说, 要求探测器的下降时间常数很长。另一方面, 从测量的角度, 为了尽快得到测量数据, 又要求探测

器的上升时间短。为了克服由于冷端温度上升导致的测量误差,在冷端的背面设计一个与前端吸收体一样的传感器。同时在吸收体周围设计了绝热层,以降低吸收体与外界的热交换。采用这种结构的探头设计,其下降时间可达到 30 秒以上,远大于被测激光脉冲的持续时间。而上升时间可达到 2 秒。

关于量值校准,目前有两种方法:外延法和与标准激光能量计比对法。

外延法:用与被测激光波长相近的激光,对能量计的示值进行校准。然后根据漫射涂层和能量传感器的光谱特性曲线进行修正。

比对法:采用与被测激光波长相同的激光,将仪器示值计与标准激光能量计比对校准,是传统的规范的方法。虽然,目前还没有适合于高能激光器能量测试的标准激光能量计,但是,可以用一台精确校准过了的光谱响应度分布平坦的激光能量计,在较小的激光能量下进行校准,对于较高的能量,靠仪器的线性来保证量值在所要求的误差范围之内。因为在仪器的生产过程中,非线性参量是最容易控制的技术指标。这种校准方法的最大优点是:能够有效地排除积分球内表面漫射率随波长的变化所形成的误差。

3 误差分析

该仪器误差源由面均匀性误差、脉冲持续时间导致的测量误差、非线性误差和校准误差等构成,各项误差分配和总不确定度如下:

面均匀性误差	1%
脉冲持续时间导致的测量误差	2.5%
非线性误差	2%
校准误差	5%
总不确定度	6%

4 实验和结论

根据不同的用户要求,按照上述理论基础和设计原则,制作了三种不同尺寸的积分球探测器,并应用于我国高能激光研究中的能量测试。很好地解决了强激光对测试仪器的破坏问题,其响应时间可达到 2 秒钟,恢复时间小于 5 分钟,具有测试数据长时间保持的功能。试验证明,这是一种对高能激光能量测试的有效方法,已被多家应用单位所认可。

参考文献:

- [1] 比由 W. 光辐射实用探测器[M]. 北京:机械工业出版社,1986.
- [2] 车念曾, 阎达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1990.
- [3] 陆耀东, 史红民. 高峰值功率激光能量计研究[J]. 中国仪器仪表,1995,(5).

Integrated sphere application in the field of powerful laser energy measurement

LU Yao-dong, SHI Hong-min, QI Xue, WANG Hao, GAO He-ping

(Beijing Institute of Opto-Electronic Technology, P.O. Box 648, Beijing 100010, China)

ABSTRACT: A method of powerful laser energy measurement using integrated sphere was introduced. The principle, design request, and error analysis are given out.

KEY WORDS: laser energy; measure; integrated sphere