

快速大功率激光功率测量

激光功率测量可以采用不同类型的传感器。本文介绍两种适用于高功率测量的系统。

文/Bernhard Neumann , Steve Wright

德国 Artifex Engineering 公司

<http://www.artifex-engineering.com/en.html>

译/北京欧普特科技有限公司 www.goldway.com.cn



传感器类型决定功能

激光光功率的测量是经由传感器将光功率转换为可测量的电流或电压来完成。传感器的物理原理将会最终决定仪器的功能。两种标准传感器可用于激光功率测量：

传感器类型	物理原理	描 述
光电二极管	产生电子-空穴	光子被半导体材料吸收，进而产生电子-空穴对。外电路连接到设备接收电流。产生电流的大小与所吸收的光功率成比例。
热电堆	塞贝克效应（热电效应）	一种设备由两种金属通过 2 个结点连接构成。当两种金属之间有温差时，2 结点之间就会产生电压。这就是所谓的“热电偶”。

热电堆传感器

热电堆传感器有许多热电偶排列组成。热电偶之间通过热并联和电串联连接。由于单个热电偶的热灵敏度 ($V/^{\circ}C$) 很低，所以实用性传感器必须由多个热电偶排列组成。

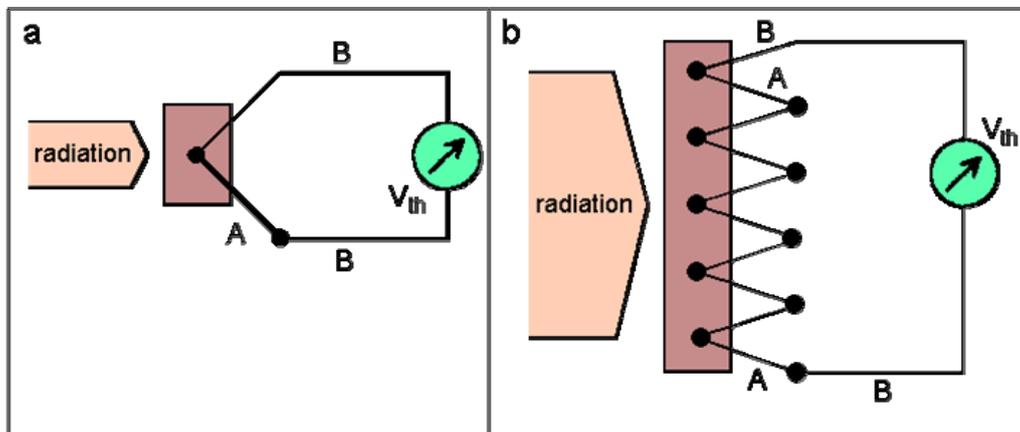


Figure 1:热电偶

热电堆 [1]

探测器表面有涂层，为钝化深黑色吸收材料。涂层的目的是在不受波长限制下尽量吸收更多的入射激光功率。

鉴于热电堆的构成，其一些特点也显现出来：

1. 热电堆有很低的感光灵敏度。
2. 周围热源可能会引起测量误差。一般的热源可能来自附近风冷设备排除的热风或者是持有传感器的手。这就限制其对低功率（<几个毫瓦）的测量。另一方面，如果传感器表面没有被损坏以及排热良好，热电堆还是比较适于高功率测量的。
3. 表面吸收材料对于测量很重要。然而涂层会随着时间推移而褪掉，进而引起校准失效。
4. 对于基于热流的测量，热电堆反应非常慢。响应时间通常>1 秒。

光电二极管传感器

光电二极管是通过存在于两电极（阳极和阴极）之间的电势差工作的半导体器件。两个电极由器件两个针脚引出的细线电联接。由于该结构的物理敏感性，该器件被封装在一个包含可通光保护窗口的金属壳内。

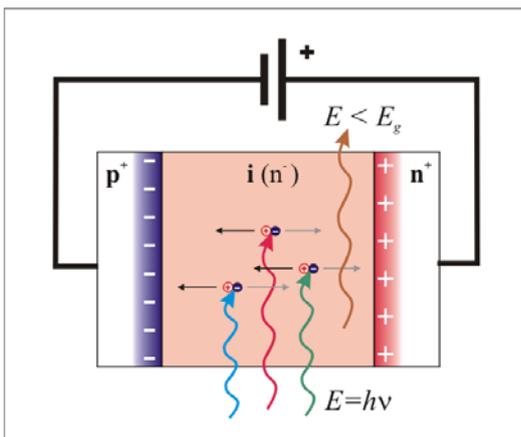


Figure 2: 光电二极管工作原理 [2]

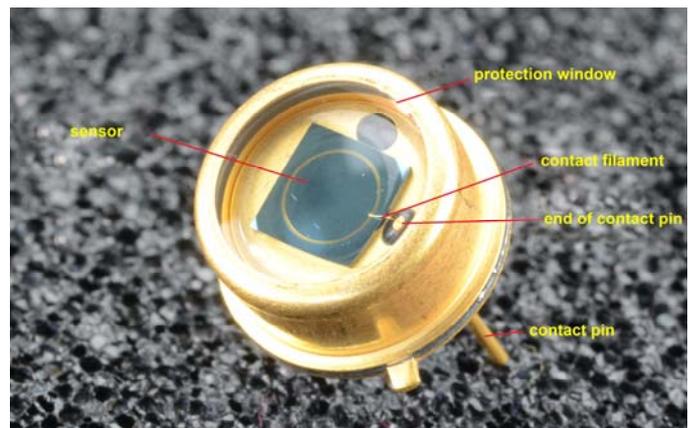


Figure 3: 光电二极管结构

从光电二极管的结构可以清楚的了解其特点：

1. 由于光子直接转换为电流，所以光电二极管对光灵敏度非常高。通常光子效率接近 100%。这就使功率测量可以达到毫微微瓦范围。也就是其测量的最大功率限制在几毫瓦以下，否则饱和：即产生的电流不再与辐射功率成比例。
2. 硅是用于可见光范围测量的材料，原料充足价格便宜。但是，由于用于近红外的材料锗和 InGaAs 价格非常昂贵。因此，传感器的尺寸受到极大限制。
3. 半导体材料有很高的折射率，所以会导致入射光束较大的反射。由于表面非常平整，所以器件会在一定程度上充当反射镜，进而导致安全隐患或者给测量设置造成困难。
4. 保护窗口充当一个不稳定的标准量具。入射光角度和入射位置的差异会使光电二极管呈现不同的总灵敏度[3]。

因为探测器面积小（许多高功率激光器的波长在 NIR 范围）而且只能测量最大为 mW 级的功率，似乎此时可以断定光电二极管不适用于高功率激光器的测量。因此许多从业者只能妥协，选择使用热电堆传感器。

但是，如果既想要测量的高分辨率，又要有宽动态范围，还要能快速测量，该怎么办呢？

积分球

积分球弥补了上述光电二极管和热电堆的缺陷。积分球为无源器件，是一个有着几个开口（端口）的空心球体。开口用于激光束的输入和输出。

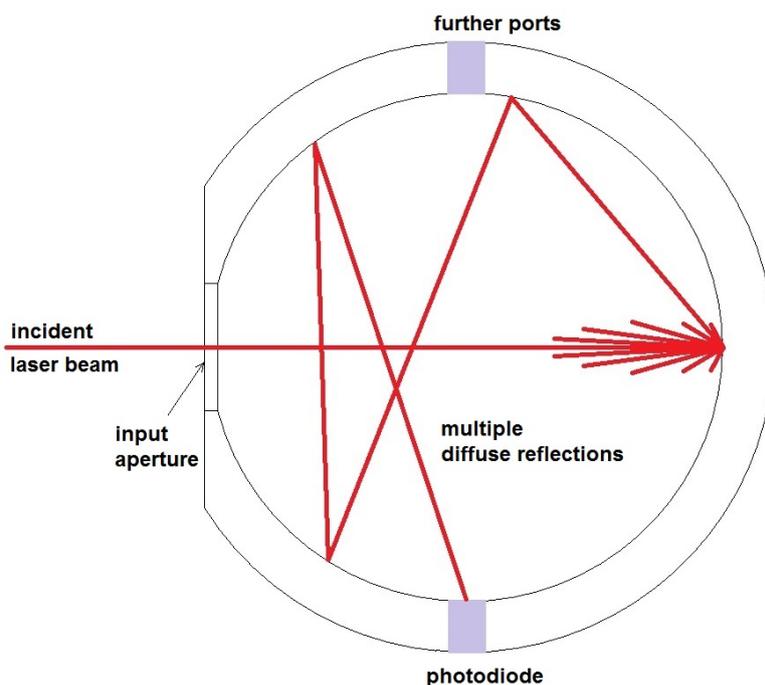


Figure 4:积分球的工作原理

空心球体的内表面由高反材料制成，可对入射光进行高度散射。因此，入射激光束会经历多次强漫反射，最后被均匀散射到整个球面。

空心球体由适于 250nm-2.5 μm 的特殊聚合物做成。涂有硫酸钡（ BaSO_4 ）的铝制球体价格虽然便宜，但是随着时间推移颜色会发黄，所以不适于精确的激光功率测量。对于波长范围 700nm-20 μm 的测量，采用在金属表面镀金的方式。许多高功率激光器的光谱范围在 700nm-20 μm ，所以，铜和铝是两种比较好的导热基底材料。



Figure 5: 配有光电二极管和光纤接口的积分球

光电二极管固定于积分球球壁，它只接收进入积分球的部分激光功率，接收到激光发生了以下重要改变：

1. 功率密度完全均匀。
2. 照射为非偏振光，即使入射辐射为偏振光。
3. 传感器上所接受的功率已经被极大削弱。

由此可见，积分球和光电二极管可以组合成一个激光功率传感器，它既可以像光电二极管一样反应灵敏，又可以检测相当大的功率。不同尺寸的积分球，对应不同的系统灵敏性。另外，此时的探测器不再受功率密度是否均匀和偏振的约束，也不再受入射光入射角度和入射位置的约束。

因为光电二极管自身尺寸不是限制因素，所以积分球可以用于较大光束直径的测量。由于积分球内表面积比其输入孔径至少大 20 倍，所以其内壁接收的功率密度要远小于热电堆表面接收的功率密度。积分球内表面材料可以承受较高的功率密度，而且不会随时间推移而发生变化。

位于积分球上的其他测量端口可为进一步应用提供便利。例如：光纤接口可以用于激光光谱的同步测量。

应用示例

举个例子，我们可以使用一个配有水冷系统的、内径 100mm 的铜制镀金积分球（<http://www.artifex-engineering.com/en/instruments/integrating-spheres.html>），测量用于材料加工的 5kW 盘式激光器实时功率波动。由于该功率等级的激光会导致积分球发热，所以光电二极管未安装于积分球上。光电二极管的温度变化会导致测量的不精确。因此，通过积分球的 SMA 光纤接口，使用光纤与光功率计（OPM150 光功率计 <http://www.artifex-engineering.com/en/instruments/optical-power-monitors/opm150.html>）连接。整个系统（积分球-光纤-OPM150 光功率计）作为一个整体进行校准，确保了精确的功率测量。光功率计通过 USB 供电和控制，极大减少了线缆的使用（只需一根 USB 线和两根水管）

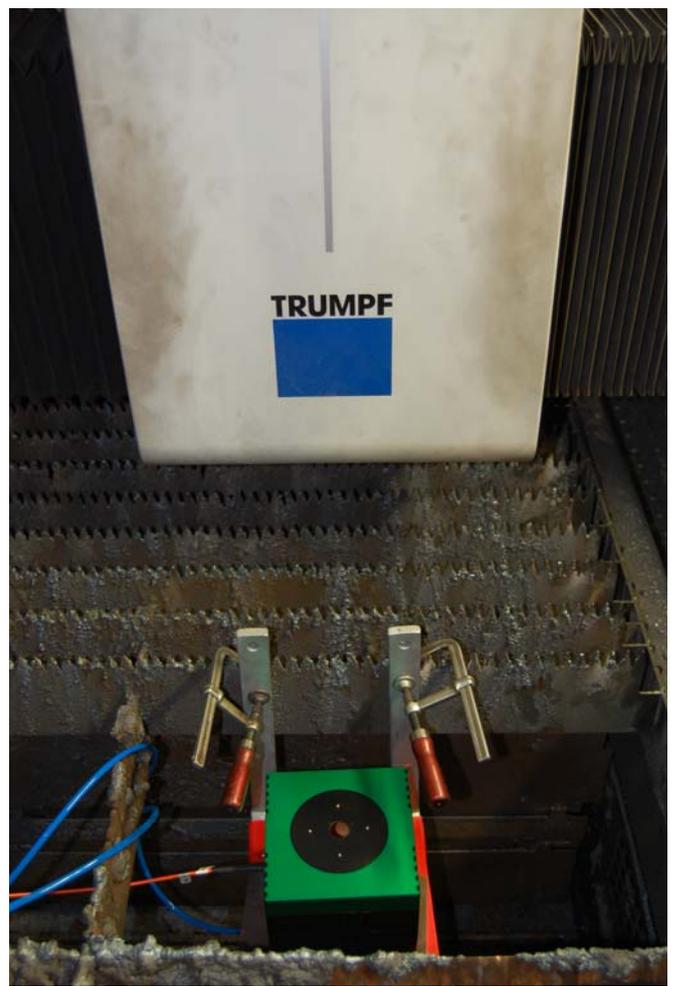


Figure 6: 在加工舱内安装积分球和光功率计



Figure 7: 透过舱室窗口观察。注意：热像仪显示的温度即为积分球表面温度（42°C）

通过该系统可以看到激光器在 2500W 非常稳定。但是当功率增大到最大功率时（5000W），会看到一个约为 1.5% 的长期波动。

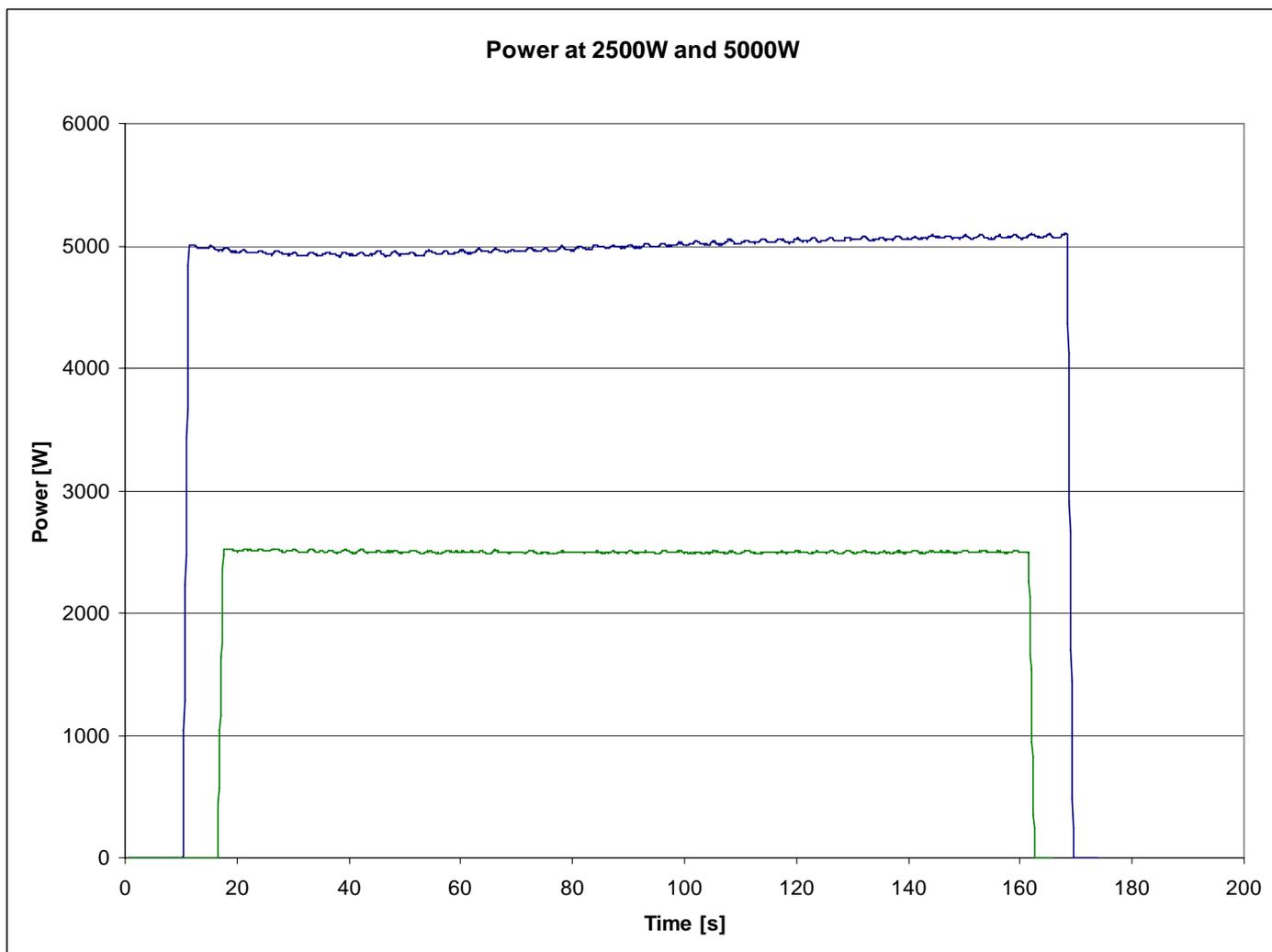


Figure 8: 功率在 2.5kW 和 5kW 的测量结果

另外，可以看到输出功率一个约为 0.7% 的更快波动。注意，这个更快波动是在一个用热电堆探测器无法检测到时间尺度上。

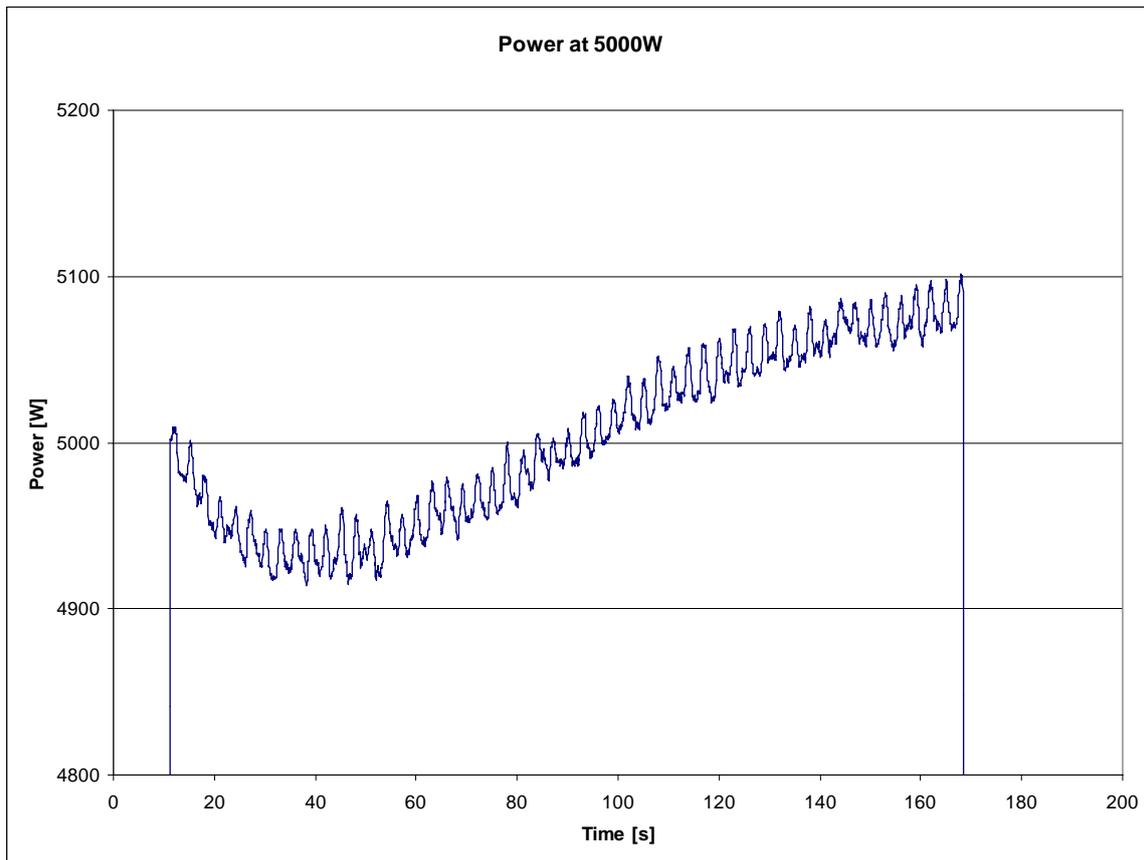


Figure 9: Figure 8 中，功率在 5kW 时的测量结果展开图

总结

由积分球和光电二极管组合成的传感器呈现出了一个几近完美的激光功率测量传感器。对于高功率激光器的测量，该组合可以让操作者看到热电堆探测器无法捕捉到的激光功率波动。这些波动包括：CW 模式运行期间波动，启动激光器时的瞬态和过冲波动，以及运行期间的短时下降波动。

另外，由于测量不受光束发散度约束，积分球可以用于基于激光应用的测量，比如：在折射物和散射物的传输。例如：积分球可以测量激光可焊接塑料材料的传输，从而确定焊接激光器的最佳运行参数。

[1]: <http://bildungserver.hamburg.de/physik/unterricht/experimente/2584640/00522-thermosaeule/>

[2]: „Pin-Photodiode “ from Kirnehkrib – own work. Licenced under CC BY-SA 3.0 by Wikimedia Commons - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pin-Photodiode.png#/media/File:Pin-Photodiode.png>

[3]: L.P.Boivin, Appl. Opt. 21(5), pp 918-923, 1982

如需了解该产品的详细信息，请联系：

北京欧普特科技有限公司 电话：010-84562860 84562550 Email:zhangweibin@goldway.com.cn