

文章编号: 1672-8785(2023)06-0044-05

百瓦级热电堆激光功率计的设计与实现

李成瑞¹ 谭景甲²

(1. 中国电子科技集团公司第 41 研究所, 山东 青岛 266555;

2. 中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 为了满足光束合成、激光对抗、材料激光损伤测试等领域的激光功率测试需求, 研制了一种基于赛贝克效应的百瓦量级热电堆激光功率测试仪器。该仪器无需偏置电压电路即可正常工作, 能够实现连续激光辐射功率测试且探测的激光功率量程宽、稳定性高。对波长为 1064 nm 的激光功率进行了测试实验。在 1.5~250 W 的功率范围内, 采用本文方案研制的热电堆激光功率计的测试结果与标准激光功率计测试结果之间的误差在±3%范围以内。

关键词: 热电堆; 激光功率测试; 红外探测器

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.06.007

Design and Realization of Hundred-Watt-Level Thermopile Laser Power Meter

LI Cheng-rui¹, TAN Jing-jia²

(1. The 41th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China;

2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: In order to meet the requirements of laser power measurement in the fields of beam synthesis, laser countermeasure and laser damage measurement of materials, a hundred-Watt-level thermopile laser power measurement instrument based on the Seebeck effect is developed. This instrument can work normally without bias voltage circuit, and can realize the continuous laser radiation power measurement with wide range and high stability. The power of the laser with the wavelength of 1064 nm is tested. In the power range of 1.5–250 W, the error between the test results of the thermo reactor laser power meter developed in this paper and that of the standard laser power meter is within the range of ±3%.

Key words: thermopile; laser power test; infrared detector

收稿日期: 2023-01-09

作者简介: 李成瑞(1994-), 男, 山东东营人, 硕士, 主要从事光电测试与红外光谱等方面的研究。

E-mail: 741668719@qq.com

0 引言

目前开展热电堆探测技术研究的单位主要包括以色列 Ophir 公司、意大利 Laserpoint 公司、美国 Coherent 公司以及国内的大恒光电公司和彩煌热电科技有限公司。

以色列 Ophir 公司采用热电堆探测器研制了一系列百瓦量级的激光功率计。百瓦量级的热电堆型功率计的散热方式一般为对流散热和风冷散热。该公司生产的 L50(150)A-LP2-35 型激光功率计采用空气对流散热, 散热方式简单, 但可探测的激光功率相对较低; 而 FL250A-BB-35 型激光功率计(感光直径为 35 mm)采用风冷散热, 散热速度快, 可探测最大持续平均功率为 250 W, 可探测的激光功率较高。

意大利 Laserpoint 公司生产的采用对流散热方式的热电堆探测器可探测的最大持续功率为 40 W, 可探测的最大间歇功率为 200 W(2 min); 采用风冷散热方式的热电堆探测器可探测的最大持续功率为 200 W, 可探测的最大间歇功率为 250 W(2 min)。

美国 Coherent 公司的百瓦级热电堆探测器采用宽带吸收材料, 响应的波长范围为 0.25 ~ 11 μm 。该公司生产的采用风冷散热方式的热电堆探测器可探测的最大间歇功率为 300 W(小于 5 min), 可探测的最大持续功率为 200 W, 响应时间约为 5 s。

在国内, 大恒光电公司的 GCI-0802200 型热电堆探测器的最高可测激光辐射功率为 200 W, 探测器的有效感光直径为 25 mm, 测量不确定度为 $\pm 5\%$, 散热方式为风冷散热。彩煌热电科技有限公司推出了自主研发的 F150-CB-30 型激光功率测量设备。该产品采用风冷散热, 功率测量范围为 50 mW ~ 150 W, 探测器的有效感光直径为 30 mm, 测量不确定度为 $\pm 3\%$ 。

经调研可知, 国外的百瓦量级的激光辐射功率测试技术已经相当成熟, 产品类型多样, 测试范围和精度远超我国水平, 在一定程度上

制约了国内激光测试技术及其相关设备的快速发展。因此, 开展百瓦量级激光辐射功率测试技术研究, 可以提高我国在激光辐射功率测试方面的自主研发能力, 缩短与国外的差距, 为激光应用研究以及激光对抗提供测试保障。

本文首先介绍热电堆探测器的基本原理, 然后着重介绍百瓦量级热电堆功率计的硬件设计方案以及校准方法, 最后对比本文设计的激光功率计与标准激光功率计的测试结果。

1 基本原理

热电堆探测器技术的基本原理是塞贝克效应^[1-4]。当两种不同的导体两端相接, 并且两个接点处于不同的温度(热端和冷端)时, 导体内部载流子会由热端向冷端迁移, 从而在两个导体构成的电路内产生电动势。这种电动势被称作温差电动势。通常把两种材料的这种组合称为热电偶, 其产生温差电动势的效应被称为塞贝克效应, 也叫第一热电效应。

图 1 为塞贝克效应的示意图。两种不同塞贝克系数的材料 A 和 B 相连, 热端的温度为 T_H , 冷端的温度为 T_L , 热端与冷端之间的温度差 $\Delta T = T_H - T_L$ 。那么在冷端材料 A 和 B 的两端点间的温差电动势 U_{out} 可表示为

$$U_{out} = \Delta T(\alpha_A - \alpha_B) = \Delta T\alpha_{AB} \quad (1)$$

式中, α_A 和 α_B 分别是材料 A 和 B 的塞贝克系数; α_{AB} 表示两种材料的塞贝克系数差值。

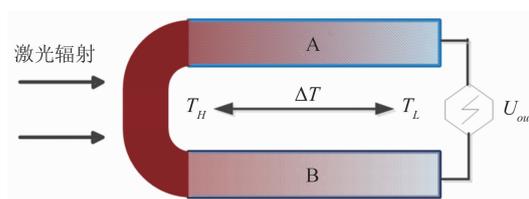


图 1 塞贝克效应的示意图

将若干个同一类型的热电偶串联起来就可以形成热电堆。图 2 为热电堆探测器的工作原理示意图。一般在热电堆的热端加一层吸收层(高吸收率的黑色物体)。当激光投射到吸收层上时, 吸收体几乎吸收全部辐射功率而升高温度, 每个热电偶的热端温度随之升高, 产生温差电动势。热电偶串联使得输出的温差电压信

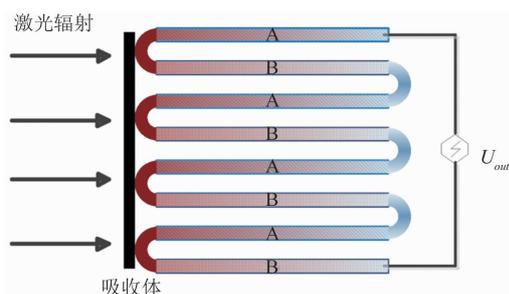


图 2 热电堆探测器的工作原理示意图

号累加放大。热电堆输出的温差电压信号的大小反映了激光辐射的功率大小。在相同的辐照条件下，与单个热电偶相比，热电堆可以提供更大的温差热电势，因此有着更广泛的应用前景。

2 方案设计

本项目拟采用基于塞贝克效应的热电堆探测器响应激光信号，通过滤波、有效信号放大以及信号采集处理等来实现毫瓦到百瓦量级连续激光功率测量。本项目的硬件方案主要包括激光探测模块、信号调理模块、数据处理模块、控制模块以及电源模块(见图 3)。

激光探测模块(即热电堆探测芯片)主要负责探测辐射到热电堆探测芯片吸收体表面的激光功率，实现光到电的能量转换，并将电信号传输到信号调理模块中。激光探测模块输出的电压信号仅为微伏到亚毫伏量级，只有经过调理后才具有处理价值。

信号调理电路^[5]是热电堆探测器信息处理系统中的重要组成部分。在充分抑制噪声的前提下，信号调理模块主要通过对微弱信号的隔离、放大以及滤波等来实现探测信号的有效放大，同时保证最小的失真。为了解决大动态电信号的自适应处理、提高激光功率测试能力，并实现激光功率的实时测试与显示，本项目设计了自适应大动态信号处理电路。它主要包含自适应放大电路、四阶巴特沃斯低通滤波电路^[6]、差分采集电路、现场可编程逻辑门阵列控制电路^[7]、实时校准补偿电路、中央控制电路、实时显示电路、接口电路等。

经过调理后的探测信号被传输至数据采集模块。该模块中的 FPGA 逻辑电路控制模数转

换器进行采集累加取平均，并将信号传输到控制模块中。控制模块是热电堆探测器主机的控制中枢，根据数据处理方法并结合温度补偿电路，将处理后的探测信号转换成相应的激光功率值，再控制显示模块进行显示输出。电源模块主要负责为信号调理电路、数据采集处理电路以及控制电路等提供稳定的电源。

3 功率计校准

数据校准包括表头校准和探头校准两部分。其中，表头校准采用直流稳压源接入主机模块，并记录此时模数转换器采集到的电压值。表头校准包括 4 个档位的校准：0 档校准时，直流稳压电源在 $-2.0\sim 2.0$ V 之间间隔 0.5 V 输入；1 档校准时，在 $-0.4\sim 0.4$ V 之间间隔 0.1 V 输入；2 档校准时，在 $-40\sim 40$ mV 之间间隔 10 mV 输入；3 档校准时，在 $-4\sim 4$ mV 之间间隔 1 mV 输入。分别记录各电压输入下模数转换器采集到的电压值，并使用 Matlab 软件计算两者之间的线性关系，从而得出斜率和截距的具体数值。将数据结果作为每个档位的校准因子，并将其写入 E2ROM 中。

第二步是探头校准，分 4 个量程对数据进行采集处理。第一个量程可测试的激光功率范围为 $1.5\sim 5$ W，控制激光功率在该功率范围内间隔 0.5 W 入射；第二量程功率范围为 $5\sim 25$ W，控制激光功率在该功率范围内间隔 5 W 入射；第三量程功率范围为 $25\sim 100$ W，控制激光功率该功率范围内间隔 10 W 入射；第四量程功率范围为 $100\sim 250$ W，控制激光功率在该功率范围内间隔 20 W 入射。对功率—电压数据进行线性拟合，并将得出的斜率和截距作为 4 个量程的校准因子。

4 实验结果

本项目搭建的热电堆激光功率计性能测试系统如图 4 所示。入射光波长为 1064 nm。在 $1.5\sim 10$ W 功率范围内，间隔 1 W 左右取点测试；在 $10\sim 250$ W 功率范围内，间隔 10 W 左右取点测试(结果见表 1)。

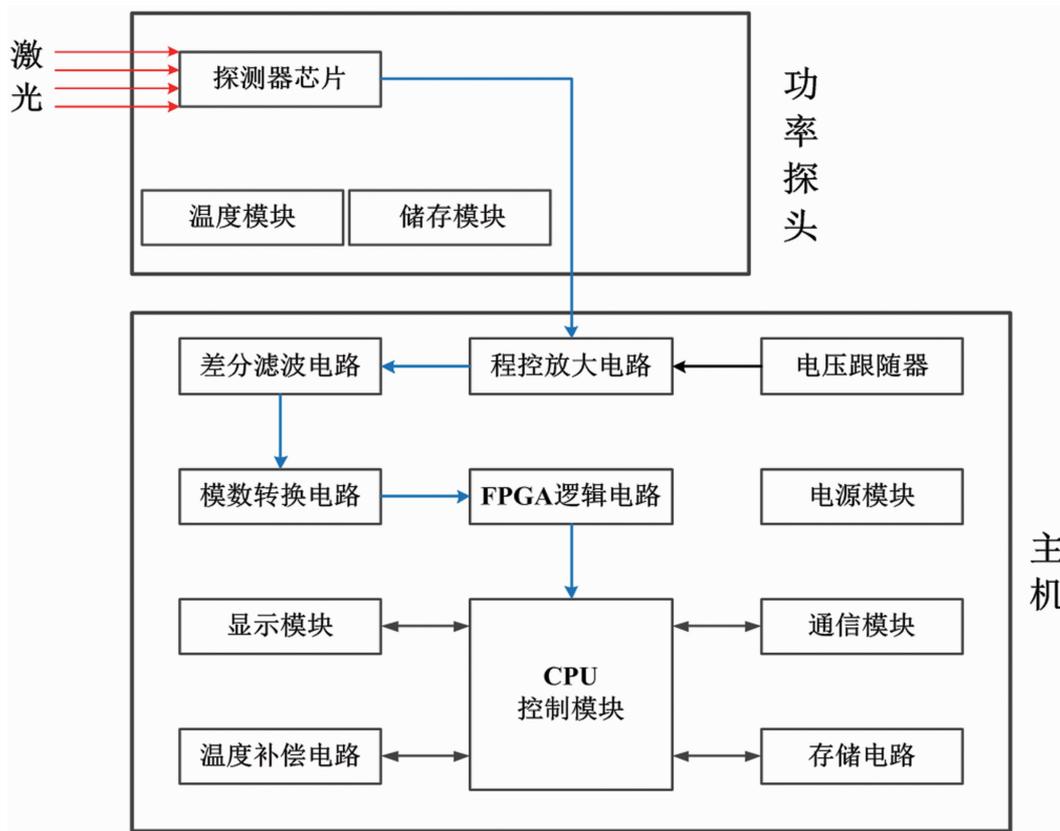


图 3 百瓦级热电堆激光功率计的硬件设计方案

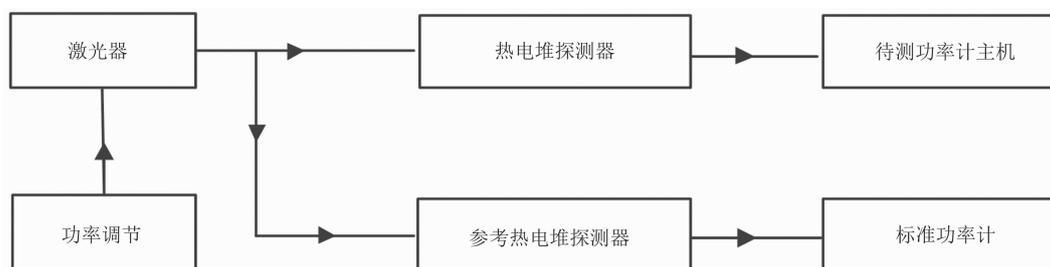


图 4 热电堆功率计测试系统示意图

表 1 标准功率与测试功率对比

标准功率/W	测试功率/W	标准功率/W	测试功率/W	标准功率/W	测试功率/W
1.488	1.508	30.1	29.987	136.5	136.148
2.51	2.452	39.2	38.772	149.8	149.769
3.031	3.001	48.9	48.065	162.9	162.097
3.996	3.987	58.2	57.575	175.7	175.550
5.04	4.997	67.5	66.556	188.8	189.463
6.07	5.987	76.8	76.641	195.3	195.168
7.02	6.959	86	85.748	207	207.083
8.1	7.999	96.9	94.694	220	219.190
9.04	8.934	99.1	100.594	233	232.237
9.54	9.542	111.8	110.575	246	246.320
19.1	19.007	124.3	123.565		

在 1.5~250 W 功率范围内间隔取点进行多次测试, 然后将其数据与标准功率计的测试结果进行对比。结果表明, 本文研制的热电堆激光功率计的误差均在 $\pm 3\%$ 以内, 测量数据准确性高。该功率计响应时间短, 测试结果重复性好, 可满足本实验室光电测试方向相关项目中光束探测以及功率测试的需求。同时, 我们还对 532 nm 绿光光源以及 2~14 μm 红外光源进行了功率测试实验。结果表明, 本文研制的功率计可实现快速响应和准确测试。

5 结束语

本文基于塞贝克效应研制出一款实用的百瓦量级激光功率计, 验证了热电堆方案在大功率激光功率测试中的可行性。本文研制的功率计可实现对 1.5~250 W 激光的精确测量, 测量误差在 $\pm 3\%$ 以内。该功率计相较于国内其他产品具有功率测试范围大、响应时间短等优点, 对激光器研制与生产、光束合成、激光损伤测试等方向具有重要意义。目前存在的主要问题是 1.5 W 功率以下的测试结果波动较大。下一步拟从硬件电路和软件算法两方面进行优化, 重点解决 100 mW~1.5 W 激光功率测试

的准确度问题。

参考文献

- [1] Bao A, Lei C, Mao H Y, et al. Study on a High Performance MEMS Infrared Thermopile Detector [J]. *Micromachines*, 2019, **10**(12): 877.
- [2] 夏燕, 薛晨阳, 欧文, 等. 基于黑硅为吸收层的热电堆红外探测器 [J]. *仪表技术与传感器*, 2012, **42**(3): 11-14.
- [3] 王楷群. 热电堆红外探测器的设计与性能测试 [D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [4] 徐峥谊. 微机械热电堆红外探测器 [D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2002.
- [5] 陈彦丽, 罗通顶, 田耕, 等. 一种大动态高带宽模块化的信号调理电路设计 [J]. *现代应用物理*, 2022, **10**(2): 44-48.
- [6] 朱思浩, 罗显志. 可配置八阶巴特沃斯低通滤波器的设计 [J]. *湖北大学学报(自然科学版)*, 2021, **43**(3): 276-281.
- [7] 张君涵, 唐灏, 张玉华. 基于现场可编程逻辑门阵列的 STM32 单片机自动下载通用串行总线的设计 [J]. *信息记录材料*, 2022, **23**(3): 108-111.
- [8] Sui S, Zhao T. Active disturbance rejection control for optoelectronic stabilized platform based on adaptive fuzzy sliding mode control [J]. *ISA Transactions*, 2021, **125**: 85-98.
- [9] 刘红. 光电跟踪设备测试技术研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2021.
- [10] 贾峰, 李桂芝, 李阳. 光电经纬仪室内检测系统的研究与应用 [J]. *飞行器测控学报*, 2011, **30**(3): 32-35.
- [11] 张宁, 沈湘衡, 杨亮, 等. 利用动态靶标谐波特性评价光电经纬仪的跟踪性能 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(6): 1286-1294.
- [12] 解迎刚, 兰江雨. 协作机器人及其运动规划方法研究综述 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, **57**(13): 18-33.

(上接第 43 页)