

基于高性能黑硅 MEMS 热电堆的激光功率测试方法

李竞男^{1,2} 鲍爱达^{1,2} 秦丽^{1,2}

¹中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051

²中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 针对传统激光功率计体积庞大、响应速度慢且检测精度难以保证的缺陷,提出了一种基于高性能黑硅 MEMS 热电堆的激光功率测试方法。该测试方法利用激光的热效应,以 CO₂ 激光器为被测激光光源,黑硅 MEMS 热电堆探测器为激光探测传感器。根据能量转换原理,热电堆吸收激光辐射的能量转换为自身热力学能,热力学能以电压的形式输入 CMOS 接口电路。通过 TopView2000 通用虚拟仪器应用软件采集和处理数据,获得激光功率相关数据。在室温条件下,对 MEMS 热电堆激光功率检测系统在不同占空比和不同出光时间的 CO₂ 激光照射下,进行重复实验。结果表明,在激光输出占空比为 30%、总出光时间为 150 ms 条件下,系统热响应时间为 14.92 ms,计算出激光功率值为 23.01 W,测量相对偏差为 0.55%,满足了实际应用中激光功率高精度、低成本、低功耗、强便携性等的需求。

关键词 光电子学; 光电检测; 激光功率测量; CMOS 接口电路; 黑硅 MEMS 热电堆探测器

中图分类号 TH247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.112501

Laser Power Measurement Method Based on High Performance Black Silicon MEMS Thermopile Power Meter

Li Jingnan^{1,2} Bao Aida^{1,2} Qin Li^{1,2}

¹ School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

² National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract Traditional laser power meter has the defects of large volume, slow response, and are difficult to guarantee the detection accuracy, so a laser power measurement method based on high performance black silicon MEMS thermopile power meter is put forward. The test method uses the laser thermal effects, and CO₂ laser is used as the measured laser source, and the black silicon MEMS thermopile detector is the laser detection sensor. Based on the principle of energy conversion, the absorbed laser radiation by a thermopile is converted into its thermodynamic energy, and the thermodynamic energy is input to the CMOS interface circuit in the manifestation of the potential. Potential input data are collected and processed by TopView2000 application software, and the data of the laser power are obtained. Under the room temperature condition, the MEMS laser power detection system repeat test is carried out under the CO₂ laser irradiation with different duty cycles and different light time. Under the conditions of 30% laser output duty ratio and the 150 ms total light time, the experimental results show that the response time of the system is 14.92 ms, the laser power value is calculated as 23.01 W, and the measurement uncertainty of the system is 0.55%, which meets the needs of high precision, low cost, low power consumption and portability of laser power in practical application.

Key words optoelectronics; photoelectric detection; laser power measurement; CMOS interface circuit; black

收稿日期: 2016-07-11; **收到修改稿日期:** 2016-07-27; **网络出版日期:** 2016-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(51375463)、山西省自然科学基金(2014011021-5)

作者简介: 李竞男(1992—),女,硕士研究生,主要从事基于 MEMS 热电堆探测器的激光功率测试系统方面的研究。

E-mail: 452308834@qq.com

导师简介: 秦丽(1963—),女,博士,教授,主要从事集成测量系统及仪器、惯性测量系统、动态测试及可靠性分析方面的研究。E-mail: qinli@nuc.edu.cn

silicon MEMS thermopile detector

OCIS codes 250.3140; 230.0250; 230.5160

1 引言

因为具有速度快、精度高、距离远、不受电磁波干扰、持续性强等突出优点,激光技术被广泛应用于军事中,涉及激光武器、激光侦察、激光制导、激光通信等诸多领域^[1],激光功率的精确测量成为各种光学实验中非常重要的一个环节。由于 CO₂ 激光器输出的高功率激光对常规的探测器极易造成伤害,常规光电检测技术不能用于激光功率测量^[2]。为了实现对激光输出功率的精准测量,需要一种操作简单、高精度、小型化和快速实时的测量方法。目前国内外激光功率的测量方法主要有以下三种^[3-7]:1) 光电探测器测量激光功率,该方法对环境条件适应性强,响应速度较快,但其功率线性范围为纳瓦至毫瓦级且测量精度低,不满足军事中对激光功率高精度的要求;2) 热释电型探测器测量功率,该方法对测量脉冲频率大于 5000 Hz 的激光功率效果很好,但探测器耐用性差,难以满足军事对器件稳定性的严格要求;3) 热电探测器测量功率,一般采用普通热电堆做探测器,相对其他测试方法,该方法准确度较高、光谱响应曲线较平坦,但响应速度慢、体积大、成本高,无法保证在军事中对激光功率的快速精准测量。

本文提出采用高性能黑硅微机电系统(MEMS)热电堆作为探测器的激光功率测量方法,被测激光信号通过黑硅 MEMS 热电堆探测器以电压信号输出。该测量方法以响应速度快、实时性强的优势在激光应用中具有广阔的发展前景。

2 激光功率检测原理

系统采用红外(IR)检测技术,以辐射波长为 10.6 μm 的 CO₂ 激光器为测量对象,以黑硅 MEMS 热电堆红外探测器为敏感器件,以微信号调理电路、TopView2000 虚拟仪器应用软件为辅助装置完成激光功率测量。

该测量方法利用激光的热效应,其系统原理如图 1 所示。将 MEMS 热电堆探测器的红外吸收区对准 CO₂ 激光器的出光口,并使其中心位置与激光束保持在同一水平线上。精密电控台控制激光器产生脉冲激光投射至探测器吸收区的中心位置,热电堆探测器获取激光辐射后转换成电压信号,经调理电路斩波放大后,通过 TopView2000 虚拟仪器应用软件分析、修正得到准确的输出电压值及系统响应时间。

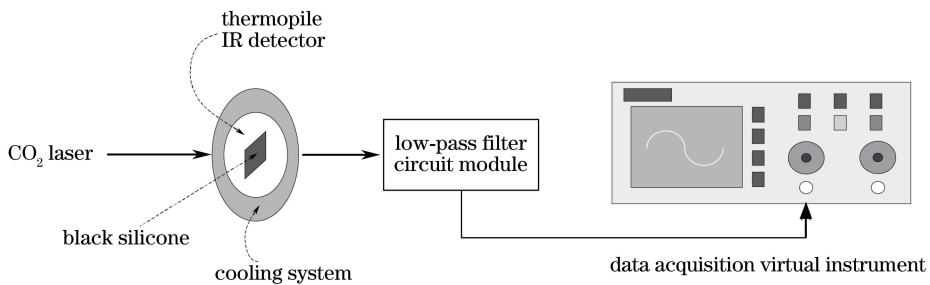


图 1 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of the system

测量结果为有效时间内激光对探测器进行加热的功率。其关系式为^[8]

$$P(t) = E(t)f, \quad (1)$$

$$E(t) = kQ(t) = kcmT(t), \quad (2)$$

式中 $Q(t)$ 为激光能量, k 为激光能量吸收体对激光辐射能量的吸收率, f 为激光脉冲频率, $T(t)$ 为冷热端温度差, c 为吸收体的比热容, m 为吸收体的质量, t 为探测器吸收激光辐射的有效时间。测量中,热电堆探测器的输出电压为^[9]

$$\Delta U = N\alpha T(t), \quad (3)$$

式中 N 为热偶条对数, α 是两种材料的泽贝克(seebeck)系数差。

由(1)~(3)式可知,在同一频率激光照射下, f 为固定值,故激光功率与探测器冷热端温差存在一定的

线性关系,而探测器温度差 $T(t)$ 由热电堆探测器的输出电压值线性表示。

在整个测量过程中,初始时吸收区自身的温度较低但温升较快,随着有效时间 t 的变化,吸收区的温升逐渐趋近于饱和。根据吸收区的初始温度 T_0 ,将其进行加权运算,结合 $T(t)$ 与输出电压 ΔU 的线性关系,可得被测激光功率。

3 红外探测器及信号调理电路设计

3.1 黑硅 MEMS 热电堆红外探测器

红外探测器是激光功率计的核心部分,而响应率和探测率是决定红外探测器性能的重要指标。选用毛海央等^[10]自主研发的基于 MEMS 热电堆红外探测器件,采用新型黑硅材料作为红外吸收材料,其外侧设有四组均匀分布的热电堆。探测器件封装后如图 2 所示。吸收入射激光后,热电堆热端和冷端的形成温度差,从而引起热电堆两端由泽贝克效应而产生的电压,其值大小取决于入射激光量。经实验测试,探测率为 $4.58 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,波长响应范围为 $0.2 \sim 20 \mu\text{m}$,测量灵敏度为 $20 \mu\text{W} \sim 25 \text{ W}$ 。

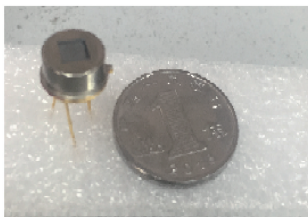


图 2 封装后器件

Fig. 2 Packaged device

3.2 信号调理电路设计

由于 CMOS 工艺会造成热电堆红外探测器在材料、器件结构以及加工工艺等条件上的限制,使得探测器的输出信号较小,因而不能直接采用普通的仪表放大器结构,否则放大器的自身噪声将可能淹没探测器的实际输出信号^[11-12]。所以,在抑制噪声的前提下对微弱信号幅度的放大是提取有效信号的关键。

采用 LinCMOS 工艺生产、具有优异的高精度低漂移特性的 TLC2652 作为运算放大器,结合电阻-电容 (RC) 元件与高精度斩波稳零运算放大器组成放大滤波电路,来实现对微弱信号的放大调理,如图 3 所示。图 3 中 GND 代表接地,VEE 代表负电源,P1 代表电路输出,P2 代表电路输入;SBI 代表断路器,VDD 代表正电源 CLM 代表电源板。

由热电堆红外探测器及微信号调理电路构成光电探测模块,实物图如图 4 所示,红外探测器的有效吸收

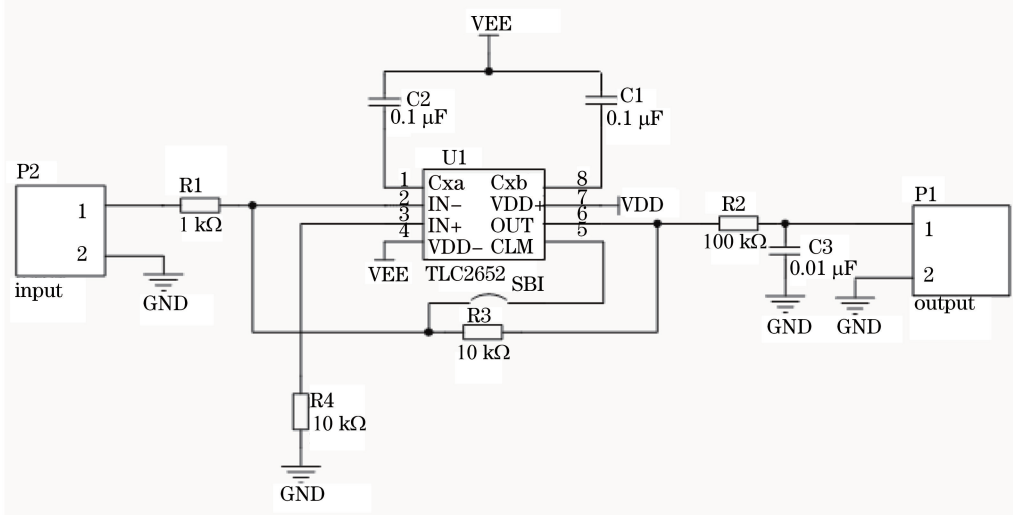


图 3 信号调理电路

Fig. 3 Signal processing circuit

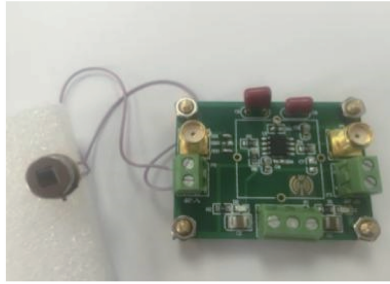


图4 光电探测模块实物图

Fig. 4 Picture of the photoelectric detection module

面积为 $500\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, 调理电路采用陶瓷电容进行电源退耦, 抑制了电源的高频噪声。经测试, 在 $5\ \text{V}$ 的电源电压和 $450\ \text{Hz}$ 的斩波频率下, 接口电路具有 $0.5\ \mu\text{V}$ 的输入等效失调电压典型值, $23\ \text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ 的输入等效噪声, 开环增益达 $150\ \text{dB}$, 单位增益带宽为 $1.9\ \text{MHz}$ 。

4 系统测试

为验证所设计激光功率测试方法的可行性, 测试过程中选在特定的精密光学平台上建立实验平台。实验中以波长 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器作为激光光源, 调整热电堆探测器支撑架的同轴度, 使吸收区中心位置与激光束保持同一水平位置。采用调节光学谐振腔控制光束的传播方向, 确保光束投射在吸收区。

利用计算机 PWM 控制器实时调节输出激光的占空比, 改变激光的出光时间。在激光周期为 $100\ \mu\text{s}$, 占空比分别为 10% , 20% , 30% , 出光时间为 $10\sim 200\ \text{ms}$ 的条件下进行实验, TopView2000 虚拟仪器控制软件采集探测器的输出电压值, 并实时记录激光器的功率基准值。选择激光输出占空比为 30% 、总出光时间为 $150\ \text{ms}$ 条件下, 记录探测器的热响应时间。

5 实验数据分析

测量装置对输出占空比分别为 10% , 20% , 30% , 总出光时间为 $10\sim 200\ \text{ms}$ 的激光器进行实验。结合 (1)、(2) 式和热电堆探测器输出电压值, 取黑硅热电堆对激光辐射的吸收率 k 值为 98% , 计算不同情况下的激光功率值, 得到数据如表 1 所示。当输出电压值达到平衡值的 63.2% 时, 探测器的热响应时间为 $14.92\ \text{ms}$, 经过 $1\ \text{s}$ 后稳态的测量结果即激光功率值, 如图 5 所示。

表1 实验数据表

Table 1 Test data table

Time /ms	Pulse width					
	10 μs		20 μs		30 μs	
	Measured value /mV	Power /W	Measured value /mV	Power /W	Measured value /mV	Power /W
10	56.7626	0.5	78.125	1.05	91.8579	1.61
20	73.1713	1.01	142.822	2.13	201.252	2.22
30	85.6835	1.58	184.834	3.18	352.783	4.56
...
150	550.129	7.98	1426.9	16.22	2085.17	23.01
160	605.083	8.49	1513.5	17.11	2256.77	24.59
170	669.965	9.09	1604.22	18.02		
180	731.044	9.88	1713.42	19.17		
190	783.674	10.11	1805.1	20.03		
200	837.205	10.67	1901.06	21.25		
Uncertainty		0.54%		0.56%		0.55%

根据实验结果,激光功率测量值与激光功率基准值相比,其平均相对偏差为 0.54%,0.56%,0.55%,标准测量相对偏差小于 1%,具有较高的测量精度。调理电路输出电压值 V 与有效时间 t 具有较好的线性关系,如图 6(a)所示。同时激光功率 P 与热电堆探测器吸收红外辐射的有效时间 t 呈良好的线性关系,其关系图如图 6(b)所示,与测试原理(1)~(3)式符合,从而验证了激光功率在瞬态变化过程中与其有效时间呈正比例关系。

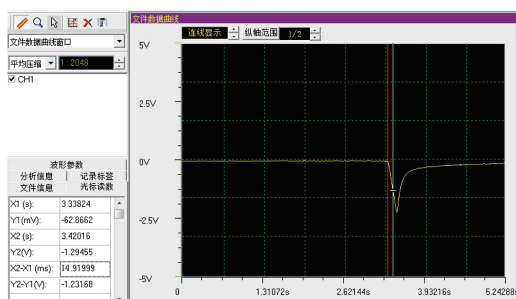


图 5 MEMS 热电堆探测器的热响应时间

Fig. 5 Thermal response time of MEMS thermopile detector

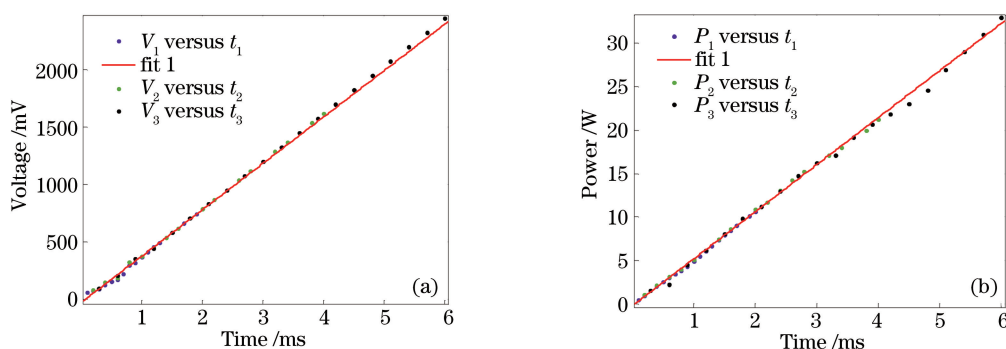


图 6 (a) $V-t$ 曲线图; (b) $P-t$ 曲线图

Fig. 6 (a) $V-t$ curve; (b) $P-t$ curve

6 结 论

针对在军事应用中对激光功率精确度的高标准要求,设计了基于 MEMS 热电堆的激光功率测试方法,给出了测量方法中的关键器件、关键技术的基本原理。选取的 MEMS 热电堆探测器体积较小,只需测得其输出电压值并经计算就可以得到激光功率值,解决了传统激光功率测量方法中探测器体积庞大、精度低、效率低下的问题。实验数据表明,整个测试过程中系统的最大测量相对偏差为 0.56%,且系统热响应时间为 14.92 ms,很好地满足了激光功率测量实时、快速、精确的要求,并为激光功率测量技术提供了一定的理论研究基础。

参 考 文 献

- 1 Wang Ruifeng, Zhang Yanpu, Xu Zhiyan. Present situation and developing trend of application of laser technique to military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s): 308-311.
王瑞凤, 张彦朴, 许志艳. 激光技术军事应用的现状及发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s): 308-311.
- 2 Li Tongbao. Some key metrological requirements in opoelectronics tecnogy and industry[J]. Journal of China Institute of Metrology, 2001, 12(2): 30-35.
李同保. 光电子技术中的若干计量测试问题[J]. 中国计量学院学报, 2001, 12(2): 30-35.
- 3 West E D, Case W E, Rasmussen A L, *et al.* A reference calorimeter for laser energy measurements[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standard, 1972, 76A(1): 13-26.
- 4 Smathers S E, Maksymonoko G. Calorimetric measurement of optical power from pulsed lasers[J]. IEEE Transactions

- on Instrumentation and Measurement, 1972, 21(4): 430-433.
- 5 Gunn S R. Calorimetric measurements of laser energy and power[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1978, 6(2): 105-114.
 - 6 Emmony D C, Bunn J C S. An absolute calorimeter for the measurement of CO₂ laser power[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1976, 9(8): 621-622.
 - 7 Lei Weining. Design of portable high precision laser power meter based on ARM [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(4): 96-99.
雷卫宁. 基于 ARM 的便携式高精度激光功率计设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(4): 96-99.
 - 8 Cheng Xiong. Study a wide range of laser power measurement system[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2006: 8-11.
程 雄. 大量程激光功率测量系统的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2006: 8-11.
 - 9 Lei C, Mao H Y, Ou W, *et al.* A CMOS-MEMS IR device based on double-layer thermocouples [J]. Microsystem Technologies, 2016, 22(5): 1163-1171.
 - 10 Mao Haiyang, Ou Wen. High performance MEMS thermopile infrared detector based on black silicon and preparation method of manufacturing same: CN102829880A[P]. 2012-12-19.
毛海央, 欧 文. 基于黑硅的高性能 MEMS 热电堆红外探测器及其制备方法: CN102829880A[P]. 2012-12-19.
 - 11 Yao Lei, Hao Yueguo, Li Tie, *et al.* A low noise CMOS interface circuit for monolithic MEMS infrared sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(10): 2203-2206.
姚 镭, 郝跃国, 李 铁, 等. 用于 MEMS 红外传感器的集成低噪声 CMOS 接口电路设计[J]. 传感技术学报, 2007, 20(10): 2203-2206.
 - 12 Enz C C, Temes G C, Circuit techniques for reducing the effects of op-amp imperfections: autozeroing, correlated double sampling, and Chopper stabilization[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(11): 1584-1614.