

热电堆型激光功率计设计与仿真

雷程¹, 武学占¹, 梁庭¹, 马野¹, 关一浩¹, 董志超¹, 李强¹, 齐蕾²

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 针对紫外、可见、红外等激光器输出功率测试需求, 提出一种由传热体、吸收层、绝缘层和热电偶构成的热电堆型激光功率计。结合热效应和塞贝克效应理论, 采用 Solidworks 三维设计软件构建不同关键结构尺寸的模型, 通过 ANSYS Workbench 仿真软件建立了热电耦合仿真分析模型, 分析关键结构尺寸参数对输出电压以及温度分布的影响关系。采用机械加工、镀膜和喷砂工艺设计热电堆型激光功率计, 设计封装结构和电路补偿对输出电压进行放大和校准, 结果表明, 传热体厚度、热偶条对数和长度都是影响激光功率计输出电压的关键性因素。

关键词: 激光功率计; 热效应; 塞贝克效应; 热电堆; 热电偶; 有限元仿真分析

中图分类号: TM933.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2022)02-0157-06

Design and Simulation of Thermopile Laser Power Meter

LEI Cheng¹, WU Xuezhao¹, LIANG Ting¹, MA Ye¹, GUANG Yihao¹, DONG Zhichao¹, LI Qiang¹, QI Lei²

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To address the need to test the output power of ultraviolet, visible, and infrared lasers, this study proposes a thermopile laser power meter composed of a heat transfer body, an absorption layer, an insulating layer, and a thermocouple. Combining the thermal effect and Seebeck effect theory, Solidworks 3D design software is used to build models of different key structure sizes, and a thermoelectric coupling simulation analysis model is established using ANSYS Workbench simulation software to analyze the influence of key structure size parameters on the output voltage and temperature distribution. The thermopile laser power meter is designed using mechanical processing, coating, and sandblasting, and the package structure and circuit compensation are designed to amplify and calibrate the output voltage. The results show that the key factors affecting the output voltage of the laser power meter are the thickness of the heat transfer body, the number of thermal couples, and the length of the thermal couple.

Key words: laser power meter, thermal effect, Seebeck effect, thermopile, thermocouple, finite element simulation analysis

0 引言

随着激光技术应用领域日益扩大, 像激光切割、激光通信和激光医疗等领域都是将激光作为载体, 以脉冲信号探测的方式进行处理、传输和接收等功能^[1]。因激光具有高能量密度、相干性、方向性、单色性等技术优势, 使得激光参数计量测试越来越受到重视^[2]。激光功率是激光器的一个重要参数, 最早

测量激光功率的装置是基于热电偶和真空腔的激光功率探测装置, 而后出现了几种不同的光功率测量结构, 直到现在不用在绝热环境下就可以达到比较高的测量精度^[3]。虽然热电堆型激光功率计响应慢, 对环境温度敏感, 但具有光谱响应范围广, 涵盖波段包括紫外到红外的特点^[4], 被学者们广泛研究。热电堆型激光功率计是基于激光的热效应和金属中的塞贝克效应^[5]制作的。早期文献中提出的激光功率计以

收稿日期: 2021-06-25; 修订日期: 2021-10-16.

作者简介: 雷程(1987-), 男, 博士, 高级实验师, 硕士生导师, 主要从事微纳红外传感、微纳压力传感及微纳器件制造与系统集成方面的研究。E-mail: leicheng@nuc.edu.com.

基金项目: 中央引导地方科技发展资金(YDZX20201400001664); 山西省自然科学基金项目(201801D221203); 高等学校科技创新项目(1810600108MZ)。

铝为传热体，一面进行阳极氧化形成氧化铝薄膜，另一面进行涂黑、镀铬或者将传热体的吸收表面进行粗化处理^[6]以达到较好的吸收率。还有改进传热体为漏斗形^[7]，实现激光在漏斗内多次反射进而提高对激光功率的吸收。还有将吸收区表面涂抹氧化石墨烯，研究可见光到近红外范围内的光响应^[8]。R. K. Soni^[9]等人采用水膜为吸收介质实现了千瓦级的激光功率测量。像国内长春 CNI 和彩煌热电都有其自主研发的产品，国外以色列 Ophir、美国 Coherent 都存在成熟的产品。但是现有文献中仅仅只是阐述了热电堆激光功率计的结构设计、器件制备、测试分析而已，而针对激光功率计结构的仿真报道较少。

本文以直径为 43.9 mm 的 5A06 铝合金作为传热体基座，吸收区厚度为 0.001 mm，以铜-康铜热电偶材料厚度为 0.001 mm，绝缘层氧化铝厚度为 0.1 mm 为基础，通过改变传热体厚度、热偶条对数和长度等关键结构参数，采用 Solidworks 三维建模软件进行模型建立，然后导入 Ansys workbench19.1 有限元热电偶耦合分析。阐明了关键变量对输出电压的影响，并设计了封装结构和选择了补偿电路，为今后热电堆型激光功率计设计与仿真分析提供了研究方向。

1 基本原理

1.1 工作原理

如图 1 所示，当激光器发出的激光束垂直入射到热电堆型激光功率计吸收层表面时，因吸收层是对辐射光谱响应范围敏感程度不同的黑色涂层，吸收层将入射辐射转化成热量吸收，同时由于传热体结构为圆盘型，该热量从吸收区表面以热辐射形式垂直辐射进入传热体。如图 2 所示，由传热体沿径向导热，同时垂直向下导热，激光功率计中心底部温度相比于边缘位置温度较高，这样导致出现温度差。由于塞贝克效应，温差引起底部串联的热电偶形成输出电压，输出电压与激光器发出的激光功率呈现一种正比例线性关系。

如图 3 所示，热电偶是基于塞贝克效应制备的，两种不同金属导体 A 和金属导体 B 串联形成一种闭合的回路，当串联回路一端的温度相对于另一端温度较高时，表明温度高的一端为热端，温度低的一端为冷端，冷端的一端将会产生电势^[10]。而激光功率计底部的热电堆是由多个热电偶串联形成热电偶花样图，相比于一个热电偶，由多个热电偶组成的热电堆更能提高器件的响应性能。

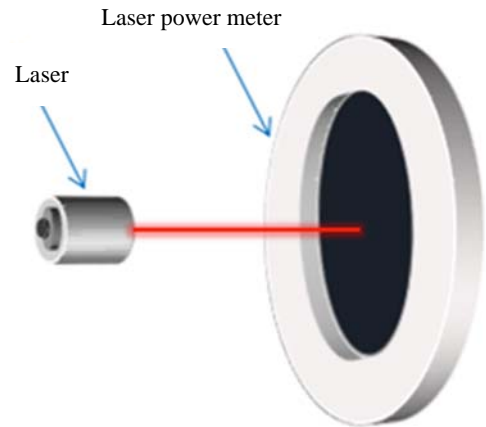


图 1 激光入射激光功率计图

Fig.1 Laser incident laser power meter diagram

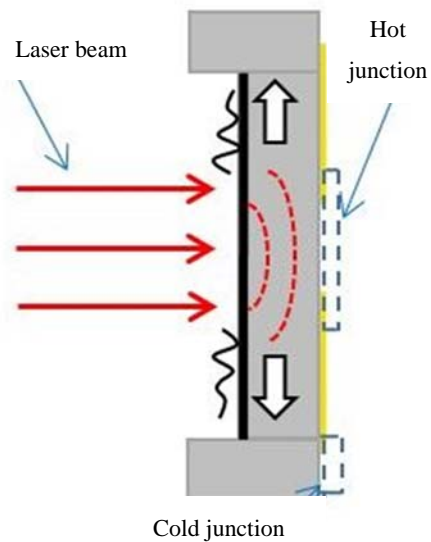


图 2 激光入射传热体截面导热图

Fig.2 The cross-sectional thermal conductivity diagram of the laser incident heat transfer body

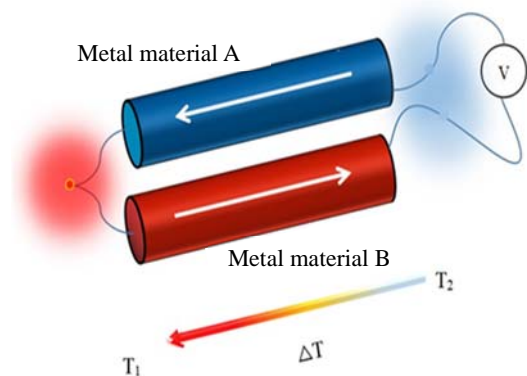


图 3 塞贝克效应

Fig.3 Seebeck effect

1.2 理论基础

激光功率计主要由传热体、吸收层、绝缘层、热电堆构成,如图4所示,在一个圆盘型的敏感受光面中心取一个极坐标,假设激光光束照射在半径为 r_1 的圆形上,这端为热端,温度为 T_1 ,热电偶的冷端分布在半径 r_2 的圆周上,温度为 T_2 ,稳态下的传导方程如式(1):

$$W = -k \frac{2\pi r d}{n} \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

式中: W 是激光束发出的入射的激光功率; n 为吸收系数; k 为受光面的热传导系数,在温度变化范围不太大的情况下通常看成常数; r 是圆盘型片子半径; d 是圆盘型片子的厚度,将上式积分,得(2)式:

$$T_1 - T_2 = \frac{Wn}{2\pi kd} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2)$$

在受光面的背后,采用磁控溅射技术溅射上 m 对串接的热电偶膜,结合两种不同金属串联因两端温差产生的塞贝克效应,输出电压如下式(3)所示:

$$V = a(T_1 - T_2) \quad (3)$$

最后,计算它所产生的热电动势如下式(4)所示:

$$V = amn \frac{W}{2\pi kd} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (4)$$

式中: a 为材料的热电系数; m 为热电偶对数。

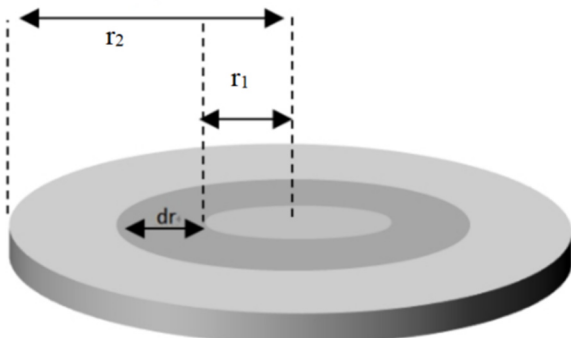


图4 用于计算热传导的结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the structure used to calculate heat conduction

2 设计优化

2.1 结构设计

热电堆激光功率计核心器件是接收头。接收头的设计包括吸热区、传热体、散热体、绝缘层和热电偶的选择。理想的激光功率计传热体受热区部分应是吸收全、光谱响应平坦、耐高温辐射、性能稳定。对于激光的单位入射能量,受热区的材料吸收率越高,吸收的能量越多,转化热能的效果也就越好。传热体一般选用导热优良的铝,散热体的设计一般有利用水

冷、风冷、以及结合具体结构设计热沉降温。绝缘层一般利用自身生成的致密氧化铝或者阳极氧化铝充当绝缘层,防止漏电。热电偶的选择比较多,输出功率变化范围线性较好的金属材质如铜-康铜、镍铬-镍铝、铂-铂铑等金属。现有设计方法包括对受热区涂光学黑漆、黑化金和制成粗糙面等。

如图5所示,本设计采用受热区镀黑铬,它是一种 Cr_2O_3 颗粒分散在 Cr 介质中的一种金属陶瓷膜,黑铬镀层对光谱的响应范围涵盖了从红外到紫外的绝大部分光谱,即波长范围在 $0.3 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的太阳光谱,本质讲,激光与普通光都是电磁波,传播速度也都为 $30 \times 10^8 \text{ m/s}$,所设计的激光功率计针对的波段是红外到紫外波段大部分都能满足,如输出波长分别为 375 nm 、 660 nm 和 1064 nm 激光器。而通过激光照射激光功率计吸收区黑铬表面,我们只考虑其黑铬的光吸收率,光吸收率在 0.9 左右以上,而且黑铬镀层具有耐高温和热稳定性。

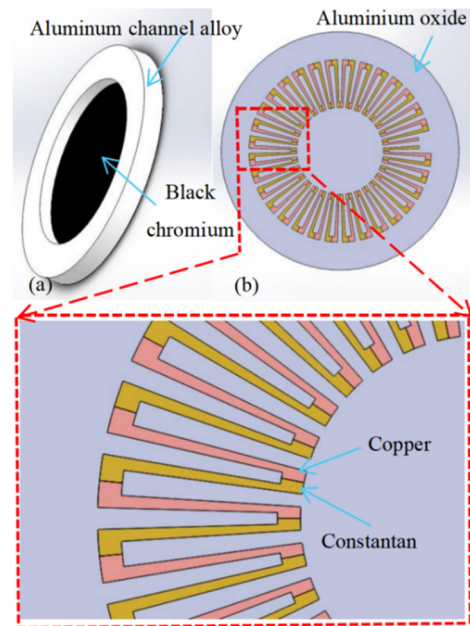


图5 激光功率计的结构示意图: (a)正面立体图; (b)背面图

Fig.5 Structure diagram of laser power meter: (a) Frontal stereogram; (b) Reverse view

考虑到 5A06 铝合金相比于铝材质,硬度大,焊接性好,延伸率高,所以选用 5A06 铝合金作为传热体。在满足一定精度要求下,结合实际出发,便于各种现场使用,轻便灵活,将散热体设计成与传热体一体结构的热沉。绝缘层采用喷砂制备氧化铝,而热电材料选择价格便宜的铜-康铜材料形成串联型的热电堆。

2.2 仿真优化

进行仿真所采用的主要热电偶材料属性, 如表 1 所示。

表 1 主要的热电偶材料属性设置

Table 1 Main thermoelectric material property Settings

Thermoelectric materials	Thermal conductivity/(W/m·°C)	The Seebeck coefficient/(V/°C)	Resistivity/(Ω·m)
Copper	397	6.5×10^{-5}	1.72×10^{-8}
Constantan	21	-3.5×10^{-5}	4.8×10^{-7}

以直径为 43.9mm 的传热体, 厚度为 1.3mm, 选取 32 对热电偶为建模基础, 采用 Solidworks 软件进行三维建模, 利用 Ansys Workbench19.1 进行热电耦合仿真, 在输入辐射功率 100 mW/cm^2 、环境温度为 25°C 作为载荷量分别加到黑铬吸收区和 5A06 铝合金基座的一体的热沉上。电压分布云图如图 6 所示, 通过仿真得出输出电压为 0.31415 mV , 而热梯度分布云图如图 7 所示, 最高温度分布至铝合金基座圆心为 25.461°C 。

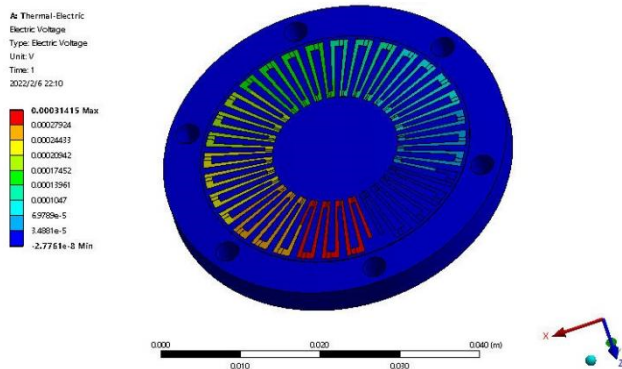


图 6 激光功率计电压分布云图

Fig.6 Cloud image of voltage distribution of laser power meter

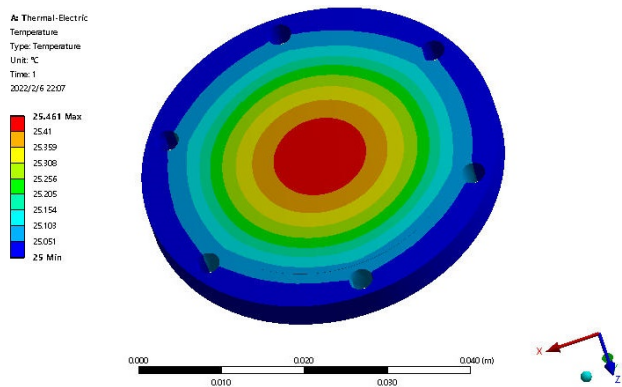


图 7 激光功率计稳态热梯度云图

Fig.7 Steady state thermal gradient cloud image of laser power meter

为了研究不同传热体厚度对输出电压的影响, 保证其他条件不变的情况下, 通过改变传热体厚度, 厚度范围为 $0.6 \sim 1.3 \text{ mm}$, 研究不同厚度下传热体的输出电压和最高点温度分布情况。通过图 8 和图 9 可以看出, 随着 5A06 铝合金基座的厚度逐渐增大, 输出电压和最高点温度都是呈现出逐渐降低的趋势。

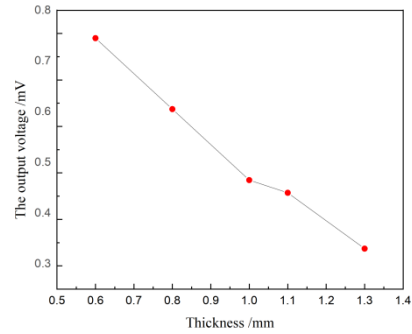


图 8 传热体不同厚度下的输出电压

Fig.8 The output voltage of heat transfer body with different thickness

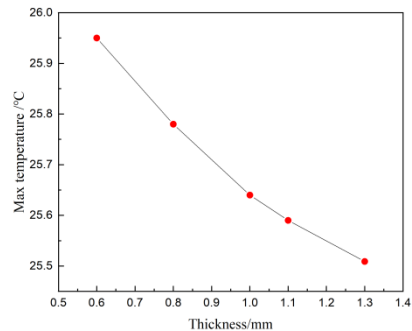


图 9 传热体不同厚度下的最高点温度

Fig.9 The maximum temperature of the heat transfer body under different thicknesses

为了研究热电偶长度对输出电压的影响, 保证其他条件不变的情况下, 通过改变热电偶长度, 长度范围为 $8.8 \sim 13 \text{ mm}$, 研究不同热偶条长度的输出电压和最高点温度分布情况, 通过图 10 可以看出, 随着热偶条的长度的增加, 输出电压呈现出逐渐增大的趋势。如图 11 可以看出, 可能由于热电偶长度增加, 导致热端靠近圆心, 同时又相互接近, 这种排布结构导致其热阻增大, 温度扩散慢, 即出现最高点温度随着热偶条的长度逐渐增大。

为了研究不同热电偶对数对输出电压的影响, 保证其他条件不变的情况下, 通过改变热电偶对数, 热电偶对数范围为 $15 \sim 32$ 对, 研究不同热电偶对数的输出电压和最高点温度分布情况。通过图 12 可以看出, 随着热电偶对数逐渐增加, 输出电压呈现出逐渐增大的趋势。因热偶条长度未发生改变, 即热端和冷端所处位置不发生改变, 即表明温度差不发生变化, 热端位置的最高温度不发生变化。

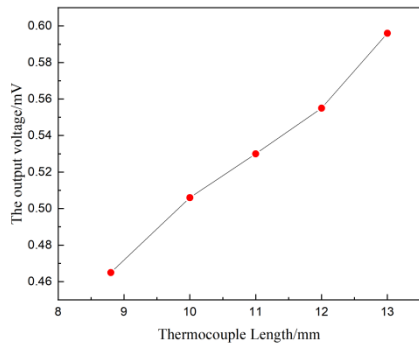


图 10 不同热偶条长度下的输出电压

Fig.10 Output voltage at different thermocouple lengths

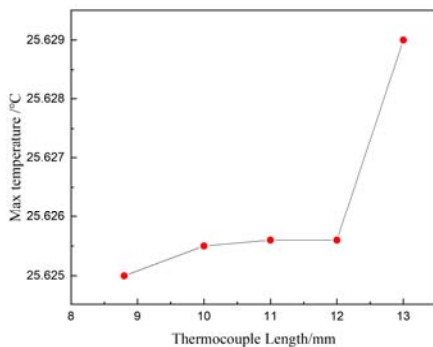


图 11 不同热偶条长度下的最高点温度

Fig.11 Maximum point temperature at different thermocouple lengths

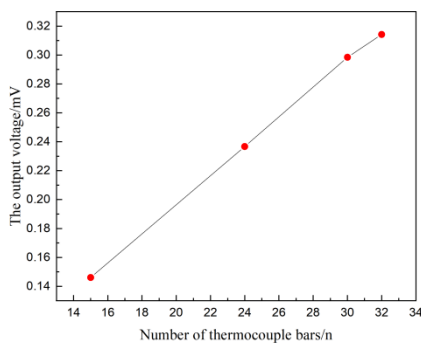


图 12 不同热偶条对数下的输出电压

Fig.12 Output voltage for logarithms of different thermocouple bars

3 制备流程设计

热电堆探测芯片采用微机电系统 (MEMS) 制作工艺、喷砂工艺以及镀黑铬工艺, 如图 13 所示为热电堆激光功率计的探头制备工艺设计。

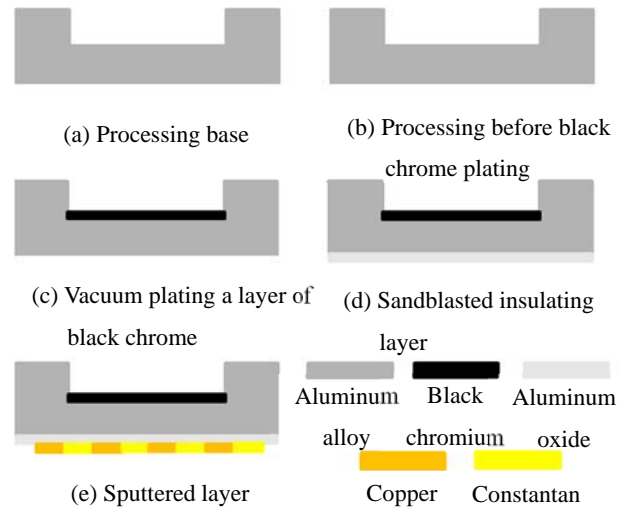


图 13 热电堆激光功率计的探头制备工艺设计

Fig.13 Design of probe preparation for thermopile laser power meter

探头具体设计制备步骤如下: ①加工基座。选用 5A06 铝合金利用车床机械加工车出基座, 对基座进行有机溶液洗涤、化学除油氮气吹干备用; ②镀铬前处理。对基座进行高温蒸洗, 超声波除蜡、一次离子水冲洗、超声波除油、二次去离子冲洗, 强风干燥备用。③真空镀黑铬。将基座悬挂至真空镀膜机腔体内, 采用铬靶材利用物理气相沉积 (PVD) 涂层工艺方式形成两面皆为亚光面黑铬, 通过砂纸打磨除了吸收区以外的部分。④喷砂绝缘层。对基座进行有机溶液洗涤、化学除油, 借助压缩空气使玻璃珠磨料强力冲刷工件表面去除表面缺陷, 利用喷砂工艺形成氧化铝薄膜, 起到绝缘层防止漏电的作用。⑤溅射热电偶花样。采用磁控溅射工艺, 利用硬掩模版在绝缘层面分别溅射康铜靶材和铜靶材形成热电偶花样图。磁控溅射原理如图 14 所示, 利用辉光放电原理使氩气在高压下电离后形成的正离子轰击靶材表面, 使靶材粒子溅射出来到达基片表面形成铜和康铜的热电堆薄膜。

图 15 所示为激光功率计的封装结构, 黑化的壳体内部通过带孔盖板采用螺栓打孔固定激光功率计, 激光功率计底部的热电偶花样的正负极与集成电路板连接, 黑化的壳体底部固定有圆形散热器^[11-12]。圆形散热器的设置是为了保证位于铝合金热沉的冷端能够保证与室温 25°C 一致, 形成当有激光入射到激光功率计表面后, 保证热端与冷端形成温度差, 提高串联的热电堆输出电压响应值。集成电路板上集成放大电路和电位器, 放大电路将由热电堆原理将热信号转化为电压信号进行放大处理^[13-14], 然后通过电位器调节输出电压值, 这里我们选用的市面上常用的 C3140 运算放大器。

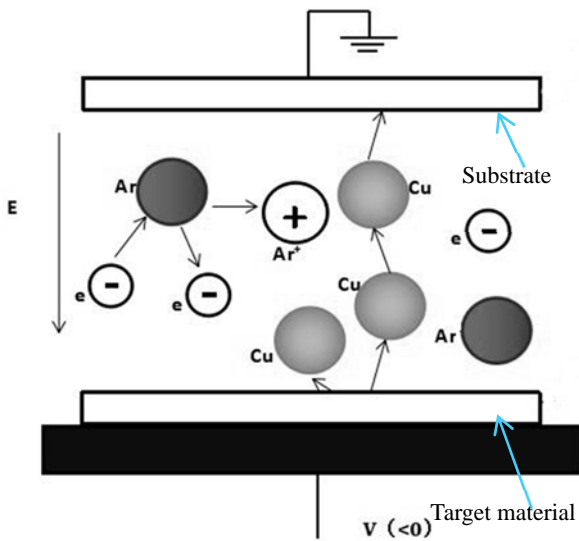


图 14 磁控溅射原理

Fig.14 The principle of magnetron sputterin

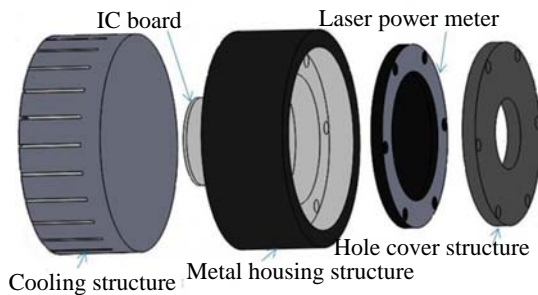


图 15 激光功率计封装结构

Fig.15 Laser power meter packaging structure

4 结语

本文利用 Solidworks 软件对激光功率计进行三维建模, 采用 Ansys Workbench 软件对激光功率计进行热电仿真分析, 通过仿真优化改变关键结构尺寸参数, 提高输出电压值, 同时设计一种封装结构进行固定, 采用放大电路和校准电路对输出电压值进行校准输出。本文对激光功率计结构和设计有一定的参考价值, 对激光功率计结构设计和仿真工作具有指导意义和参考作用, 但是也存在今后需要改进的部分, 例如传热体结构的设计, 对激光吸收的吸收区应选用全吸收、无光谱选择性、耐高温辐射、性能稳定的黑色涂层等。

参考文献:

[1] XU Bai. Calibration technology and application of laser power meter[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, **2019**(23): 8806-8811.
 [2] 林延东. 热电型光辐射探测器时间响应特性的研究[J]. *计量学报*, 2008(4): 313-316.
 LIN Yandong. Characterization of temporal response for thermal detector of radiation[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008(4): 313-316.

[3] 陈舒凡, 房丰洲. 激光功率计发展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(9): 0900003.
 CHEN Shufan, FANG Fengzhou. Development and applications of laser power meter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, **58**(9): 0900003.
 [4] 向莉. 智能微弱激光功率计的研究[J]. *中国新通信*, 2017, **19**(13): 146-147.
 XIANG Li. Research on intelligent weak laser power meter[J]. *China New Telecommunications*, 2017, **19**(13): 146-147.
 [5] 李竞男, 鲍爱达, 秦丽. 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.
 LI Jingnan, BAO Aida, QIN Li. Laser power measurement method based on high performance black silicon MEMS thermopile[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(11): 112501.
 [6] 莫旭清. 百瓦级激光功率的测量方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
 MO Xuqing. Research About the Measurement of the Laser Power with Hundred Watt Level[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015.
 [7] 黎高平, 陈超, 李栋, 等. 高能高功率激光参数测量技术研究[J]. *应用光学*, 2020, **41**(4): 645-650.
 LI Gaoping, CHEN Chao, LI dong, et al. Research on high-energy and high-power laser parameter measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, **41**(4): 645-650.
 [8] Rouhollah K, Mohammadreza A, Mohammadmehdi J, et al. Low cost and facile fabrication of broadband laser power meter based on reduced graphene oxide film[J]. *Materials Research Bulletin*, 2018, **100**: 42-48.
 [9] Soni R K, Mandloie V K, Pote M B, et al. Spinning cone water film power meter for high-power CO₂ lasers[J]. *Optics and Laser Technology*, 2005, **39**(1): 196-301.
 [10] 雷程. 双端梁 MEMS 热电堆红外探测器关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
 LEI Chen. Research on the Key Technologies of Double-end-beam MEMS Thermopile IR Detector[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
 [11] 张萍, 毕野, 孙尚勇, 等. 小型一体便携式 1060 nm 激光功率计: CN210625848U[P]. 吉林: 2020-05-26.
 ZHANG Ping, BI Ye, SUN Shangyong, et al. Small Integrated Portable 1060 nm Laser Power Meter: CN210625848U[P]. Jilin: 2020-05-26.
 [12] 潘吴达. 一种测量激光器激光功率的传感器及激光功率计: CN112729537A[P]. 浙江: 2021-04-30.
 PAN Wuda. A Sensor and Laser Power Meter for Measuring Laser Power: CN112729537A[P]. Zhejiang: 2021-04-30.
 [13] 月祥, 宁可庆, 高然, 等. 智能化激光功率计: CN201508234U[P]. 北京: 2010-06-16.
 YUE Xiang, NING Keqing, GAO Ran, et al. Intelligent Laser Power Meter: CN201508234U[P]. Beijing: 2010-06-16.
 [14] 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.
 JIANG Ganggang, XUE Lin, ZHU Dan, et al. Design of high precision laser power metre based on LPC1754[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(3): 55-58.