

〈测量技术〉

用于激光软钎焊温度测量的高精度红外辐射测温装置

李明超¹, 闫宽¹, 张聪¹, 胡记伟², 欧锴³, 陈绪兵¹

(1. 武汉工程大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430205; 2. 武汉烽火技术服务有限公司, 湖北 武汉 430065;
3. 武汉烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430076)

摘要: 在激光软钎焊加工过程中, 实时精准测量焊点温度并调节半导体激光器的输出功率对于保证焊接质量至关重要。为避免因温度测量误差过大或测量速度过慢导致的焊点焦灼、虚焊和假焊等故障, 本文设计了用于激光软钎焊的高精度红外辐射测温装置。首先描述了红外辐射测温装置的原理, 并阐述了红外辐射信号转换电路设计方法, 其次介绍了本文中所用的无限脉冲响应 Butterworth 型滤波器信号处理方法——无限脉冲响应滤波器 Butterworth 型; 最后, 通过实验分析并验证了本装置的性能。实验表明, 本装置适用于激光软钎焊焊点温度的非接触测量, 在标准黑体炉 70~260℃ 范围内测试区间, 误差基本处于±2℃之内, 最大误差为 2%, 在激光软钎焊加工过程中, 整体平均误差小于 0.8%, 可广泛应用于激光软钎焊领域。

关键词: 激光软钎焊; 红外辐射; 高精度测温; 无限脉冲响应滤波器

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2025)01-0108-07

High-precision IR Radiation Temperature Measurement Device for Laser Soldering Temperature Measurement

LI Mingchao¹, YAN Kuan¹, ZHANG Cong¹, HU Jiwei², OU Kai³, CHEN Xubing¹

(1. School of Mechanical Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Wuhan Fiberhome Technical Services Co., Ltd, Wuhan 430065, China;
3. Fiberhome Communication Technology Co., Ltd, Wuhan 430076, China)

Abstract: In the laser soldering process, real-time measurement of the solder joint temperature and adjustment of the output power of the semiconductor laser are crucial for ensuring welding quality. To avoid faults such as solder scorching, virtual soldering, and false soldering caused by excessive temperature measurement errors or slow measurement speeds, a high-precision IR radiation temperature measurement device is designed. First, the principles of IR radiation temperature measurement are introduced, and the design method of the IR radiation signal conversion circuit is explained. Second, the primary signal processing method used in this study, which is a Butterworth-type infinite impulse response filter, is introduced. Finally, the performance of the device is validated through experimental analysis. The experiments demonstrate that the IR radiation temperature measurement device designed in this study is suitable for non-contact measurement of solder joint temperature in laser soldering, with a maximum error of 2℃ within the test range of 70-260℃ in a standard blackbody furnace. During the laser soldering process, the highest temperature error is less than 0.6%, making it widely applicable to the field of laser soldering.

Key words: laser soldering, infrared radiation, high precision temperature measurement, infinite impulse response

0 引言

在微电子制造领域, 激光软钎焊(Laser Soldering)

收稿日期: 2023-10-12; 修订日期: 2023-12-20.

作者简介: 李明超 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 激光技术。E-mail: boom662@163.com。

通信作者: 张聪 (1994-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 先进制造技术。E-mail: zhangcong94@foxmail.com。

基金项目: 武汉市发展和改革委员会省级服务业发展引导资金项目 (2205-420118-89-04-487510); 姑苏领军人才计划 (ZX12022518)。

技术因其控制精确和高效装联能力，已成为焊接微型电子器件的主流方法^[1]。在这一过程中，焊点温度的精确监测与控制是确保焊接质量的决定性因素^[2]。红外辐射测温作为一项能够无接触且实时监测温度的技术，被广泛应用于激光软钎焊系统中。然而测温的准确性问题可能会对焊接过程产生重大负面影响^[3]。首先，测温误差可能会导致激光功率的不适当调整。如果测温数据偏高，激光功率可能被控制减小，导致焊点温度不足，从而影响连接的强度和可靠性^[3]。反之，如果测温数据偏低，激光功率可能被控制增大，导致焊点过热，从而引发材料的过热损伤，如晶体结构变形和微裂纹形成^[4]。

在红外辐射测温装置的辐射光电信号转换中，由于光伏探测器本身因材料特性存在暗电流^[5]，经过跨阻放大器信号放大时，静态工作电流与信号相叠加，可能导致输出信号的漂移^[6]。其次噪声引起的测量误差也需要考虑，尽管跨阻放大器在一定程度上对系统噪声进行了抑制，但整个系统运行在复杂环境中，而且信号通过电缆传输时会受到一些干扰噪声的影响^[7]，尤其是高频噪声。因此，需要对信号进行滤波处理，才能获得较好的测量数据^[7]。

根据上述需求，本文研制了一种用于激光软钎焊温度测量的高精度红外辐射测温装置，采用以下方法实现数据滤波处理与高精度测温。①采用无限脉冲响应 Butterworth 型滤波器^[8]消除噪声信号和处理误差信号，其通频带内频率响应曲线平坦，提高了红外辐射测温的检测精度。②设计了光电转换电路，采用 InGaAs（铟镓砷）光伏探测器与现场可编程门阵列芯片（FPGA）完成数据的高速高精度采集、滤波、计算^[9]。

1 红外辐射测温原理分析

红外辐射测温装置实质是一种将被测物的热红外辐射强度转化成温度值的装置，其理论依据是黑体辐射原理，即自然界中任何高于绝对零度的物体，其表面会持续地释放红外辐射。通过测量这种红外辐射，可以获得物体表面的温度^[10]。

根据普朗克定律，黑体的红外辐射强度 W_λ 和黑体的热力学温度 T 之间存在以下关系：

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)} \quad (1)$$

式中： C_1 为普朗克第一常量， $C_1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ MW} \cdot \text{m}^2$ ， C_2 为普朗克第二常量， $C_2 = 1.43 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ； λ 为黑体的红外辐射波长^[11]。

在式(1)中，被测物体的表面绝对温度较低时^[12]，

$\exp(C_2/\lambda T)$ 将远大于 1，将其改为维恩近似式：

$$W_\lambda \approx \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{C_2/\lambda T}} \quad (2)$$

在设计的高精度红外辐射测温装置中，通过被测物体在特定波段的红外辐射强度对比黑体的红外辐射强度来计算出被测物体的温度。在进行红外辐射测温时^[13]，通过近似表示后的普朗克黑体定理式(2)推导出式(3)：

$$\frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{C_1}{\lambda^5 W_\lambda} \right] \quad (3)$$

对于非黑体，适用于式(4)：

$$\frac{1}{T_0} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{C_1}{\lambda^5 \varepsilon(\lambda, T) W_\lambda} \right] \quad (4)$$

式中： T_0 为被测物体的表面温度； $\varepsilon(\lambda, T)$ 为被测物体在特定波段和温度的发射率，将式(3)和式(4)联立可得式(5)：

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{1}{\varepsilon(\lambda, T)} \right] \quad (5)$$

通过式(5)可知，单波段红外辐射测温法通过被测物体的表面发射率和工作波段波长，可以计算出被测物体的表面温度。其中，发射率可以通过查表法结合实验法得出^[14]，工作波段通常通过使用滤光片确定。

2 系统介绍

红外辐射测温装置包括光学模块、信号转换模块、数据计算处理模块以及人机交互模块，系统图如图 1 所示，实物图如图 2 所示。激光软钎焊焊点产生热辐射，热辐射信号通过滤光片，由 InGaAs 光伏探测器将光信号转换为电信号，该电信号由信号转换电路与跨阻放大器将电信号转化成电压信号。FPGA 驱动模数转换器将此电压信号转化为数字量，再由设计后的 Butterworth 型滤波器滤波处理，最后将处理后的信号计算成实际的温度值。

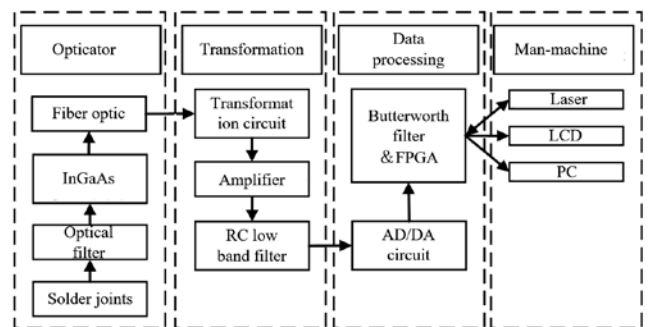


图 1 红外辐射测温装置系统图

Fig.1 System diagram of infrared radiation temperature device

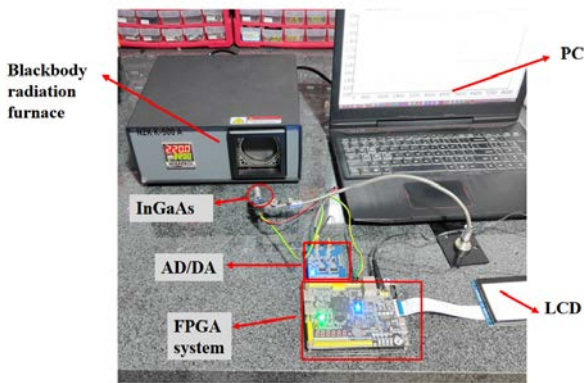


图 2 红外辐射测温装置实物图

Fig.2 System of infrared radiation temperature measurement device

2.1 信号转换电路设计

红外辐射测温传感器采用 InGaAs 光伏探测器，该探测器减少了噪音干扰，提高了探测性能，且覆盖了广泛的红外波长范围，非常适合用于高精度的红外辐射度测量^[15]。

InGaAs 光伏探测器所输出的电流信号微弱，测温装置距离系数为 50:1，假设被测物体的红外辐射能量完全被吸收，且其发射率为 1，温度为 700K。根据斯特潘·玻尔兹曼定理，可以计算出总的红外辐射出度 $M = 1.3614 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 。然而在实际应用中，经过滤波镜片选出的窄波段内的能量要小得多，由黑体辐射定理，在滤波片波长 $3 \mu\text{m} \pm 50 \text{ nm}$ 波段的能量远小于总辐射出度的 10%，并且因为大气衰减带来的影响，被测焊点的红外辐射能到达 InGaAs 光伏探测器的辐射能量低于 2 mW，故需要为其设计红外辐射信号转换电路，将信号放大并转换成主控制器能够采集的电压信号。

红外辐射信号转换电路包括光伏探测器、跨阻放大电路模块和信号放大电路模块。InGaAs 光伏探测器具有高的响应度，在 $2.3 \mu\text{m}$ 波长下表现出色^[16]。跨阻放大器为 AD825 以及外围电路组成，其具有可编程调节的增益带宽积，可以在高增益条件下保持较高的带宽。为满足测量毫秒级别温度变化的要求，该芯片的 -3dB 带宽高达 10 MHz，满足红外辐射测温需求。最大反馈电阻值可以通过(6)式来计算：

$$R_F = \frac{G_{BP}}{2\pi \cdot C_S \cdot f^2_{-3dB}} \quad (6)$$

$$C_S = C_D + C_{CM} + C_{DIFF} \quad (7)$$

将跨阻放大器 AD825 的增益带宽积 (G_{BP}) 设置为最大值，即 800 MHz。在方程(7)中， C_S 代表跨阻放大器的前端寄生电容， C_{CM} 为输入的寄生共模容值， C_{DIFF} 为输入的寄生差分容值。由数据手册计算得出 C_S

的值为 42.52 pF。将 C_S 的数值代入公式(8)，为了确保足够高的带宽，将 R_F 设置为 8 K。

为了避免运算放大器产生自激，需要设置反馈电容 C_F 进行补偿， C_F 的最小取值可由下式计算：

$$C_F = \sqrt{\frac{C_S}{R_F \cdot G_{BP} \cdot \pi}} \quad (8)$$

将 $C_S = 42.52 \text{ pF}$ ， $R_F = 8 \text{ K}$ ， $G_{BP} = 800 \text{ M}$ 代入上式计算后得到 C_F 最小取值约为 2.12 pF，为了增大系统稳定性，将 C_F 设置为 3 pF。光电转换电路组成和各元器件数值选型如图 3 所示。

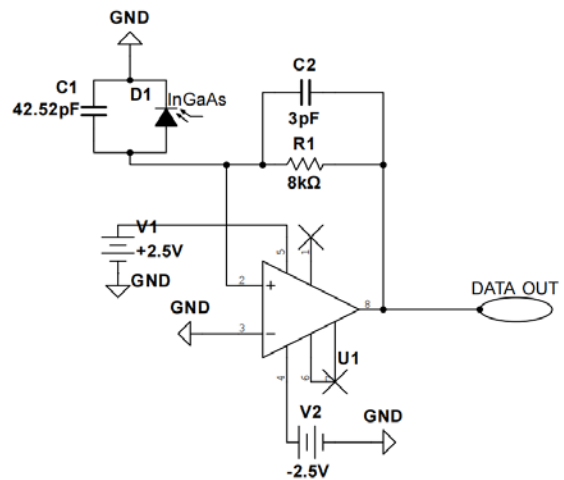


图 3 光伏转换电路原理图

Fig.3 Schematic of photovoltaic conversion circuit

2.2 信号滤波处理算法

红外辐射测温装置中的光伏探测器光电转换过程，存在暗电流和跨阻放大器静态工作电流的叠加，导致输出信号漂移，复杂的运行条件与传输电缆对系统也会带来噪声，因此要使用数字滤波器来提高红外辐射测温装置的精度。

无限脉冲响应滤波器 (IIR 滤波器) 是数字信号处理中广泛采用的一种滤波器类型。Butterworth 型和 Chebyshev 型是两种常见的 IIR 滤波器设计方法。

Butterworth 滤波器的主要特点是，在其通带范围内，频率响应曲线表现出最大程度的平坦性，也就是说，在这个范围内，信号的不同频率成分都能够通过滤波器以最接近理想的方式传递，没有明显的振荡或波动。相反，在阻带中，频率响应逐渐下降并趋近于零，以实现信号在这些频率范围内的抑制。因此特别适合于低频且对增益要求较高的场合，如在红外辐射测温装置中对焊点表面温度的测量^[17]。

Chebyshev 滤波器是 IIR 滤波器的另一种典型结构。最显著的特点是滤波器的过渡带 (从通带到阻带) 内具有更陡峭的频率衰减。然而，与 Butterworth 滤波器相比，在通带范围内，Chebyshev 滤波器的频率响应

可能会出现振幅波动，不像 Butterworth 那样平坦^[18]。由 MATLAB 仿真结果也可以看出，图 4 为 10 阶 4 种滤波器的幅频特性曲线。

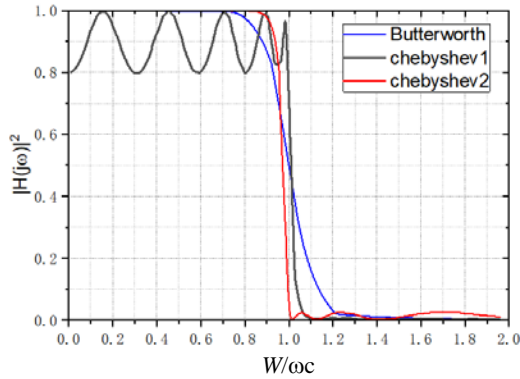


图 4 三种十阶滤波器频率响应曲线

Fig.4 Three types of tenth order filter frequency response curves

通过对这两种滤波器的比较，可得出结论，对于红外辐射测温装置来说，选择 Butterworth 滤波器更为合适。尽管它在带阻区域的衰减相对较小，但在通带内具有稳定的增益特性，这正是红外辐射测温系统所需的。另外，通过级联多个滤波器，可以提高带阻区域的衰减，从而改善系统性能。在设计初期，使用 MATLAB 对 Butterworth 滤波器的阶数与其性能进行详细的仿真分析，得出的滤波效果波形如图 5 所示。

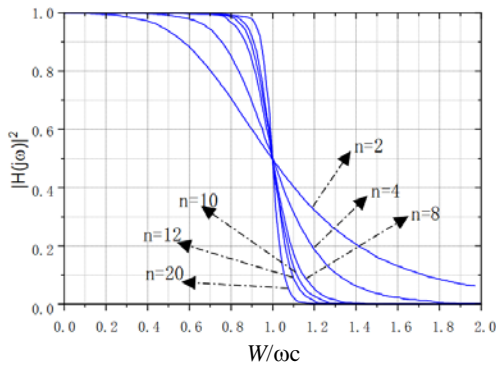


图 5 Butterworth 滤波器各阶数与过渡带滤波性能

Fig.5 Butterworth filter order and transition band

从图 5 可知，当滤波器的阶数超过 10 阶后，其性能改善的效果开始显著减弱。此外，在硬件实现方面，随着阶数的增加，所需的运放数量也相应增加，但阶数的增加也会导致系统的稳定性变得越来越不可靠，为了减少有限字长效应对 FPGA 运行的影响，综合以上诸多因素，本系统使用 10 阶滤波器级联来实现。传递函数表达式为：

$$H_1(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \prod_{k=1}^n \left[\frac{A_k (1 + b_{1k} z^{-1} + b_{2k} z^{-2} + \dots + b_{nk} z^{-n})}{1 + a_{1k} z^{-1} + a_{2k} z^{-2} + \dots + a_{nk} z^{-n}} \right] \quad (9)$$

确定了滤波器类型和阶数之后，关键的是精确计

算系统的带宽。通过测试实验，当 InGaAs 光伏探测器用于红外辐射测温，在 350℃ 以下的测温区间，其有效数据频率约为 400 kHz，其通带最大衰减 α_p 为 3 dB，为消除高频噪声误差与暗电流的误差，故要设计通带截止频率 400 kHz，阻带截止频率为 500 kHz。

利用在辐射测温时测得的第一个温度数据作为参考，实现噪声信息提取，如式(10)：

$$e(t) = x(t) / x(1)^{-1} \quad (10)$$

式中： $x(1)$ 为辐射测温数据记录的第一个点； $x(t)$ 为 t 时刻的测温数据。 $e(t)$ 为变换后的信号，此时数据的信噪比减小了，但频率特性不变。

根据滤波器阶数 $N=10$ ，在辐射测温装置测得的前 N 个时刻点的温度数据，按照式(10)转换，得到 $e(1)$, $e(2)$, \dots , $e(N)$, $t > N$ 时，按照式(11)滤波处理，得到 $e'(t)$ ：

$$e'(t) = [b(1), b(2), \dots, b(N+1)] \cdot \begin{bmatrix} e(t) \\ e(t-1) \\ \vdots \\ e(t-N) \end{bmatrix} - [a(1), a(2), \dots, a(N)] \cdot \begin{bmatrix} e'(t) \\ e'(t-1) \\ \vdots \\ e'(t-N) \end{bmatrix} \quad (11)$$

滤波后的 $e'(t)$ 使用式(12)可变换为所需的温度数据格式：

$$x'(t) = (e'(t) + 1) \cdot x(1) \quad (12)$$

$x'(t)$ 即为所需要的滤波后的温度测量数据。按照以上技术指标设计 Butterworth 滤波器。

图 6 显示了 10 阶 Butterworth 滤波器的系统带宽理论曲线以及其增益仿真效果，而在红外辐射测温装置的光电探测器工作频率 400 kHz 时，系统开始出现滚降，符合 InGaAs 光伏探测器及其光电转换电路有效信号频率需求，改善了高频噪声问题。

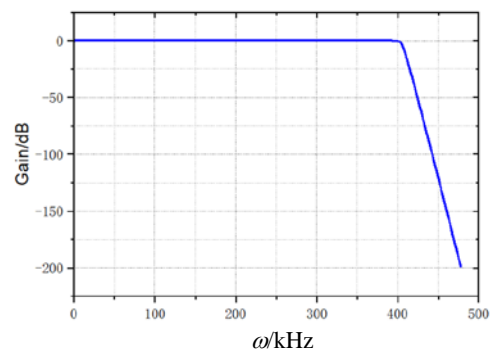


图 6 十阶 Butterworth 滤波器增益仿真

Fig.6 Gain simulation of tenth order Butterworth

3 实验验证与生产测试

3.1 标准黑体红外辐射炉实验

在实验中，使用 NKZ 品牌的 K-500 标准红外辐射黑体炉仪器作为热红外辐射源^[19]。此 K-500 标准红外辐射黑体炉发射率固定为 0.95，在工作温度 20~500℃分辨率为 0.1℃，腔深为 20mm，红外辐射面为 59 mm×59 mm。

将红外辐射测温装置的 InGaAs 光伏探测器固定在距离黑体炉观察窗 10 cm 处，启动黑体炉，设置 6 个测温节点，以 10℃为增量，从 70℃增加到 260℃，每次当炉内温度达到设定的温度节点后开始测温，分别记录红外辐射测温装置未使用 Butterworth 滤波器测得的温度数值和使用了 Butterworth 滤波器测得的温度数值。

由表 1 数据分析可以得到如下结论：

表 1 使用滤波器前后红外辐射黑体炉测温结果分析

Table 1 Analysis of infrared radiation blackbody temperature measurement results before and after filter correction

Test num/℃	Blackbody temp/℃	Temp./℃ (unfiltered)	Error	Temp./℃ (filtered)	Error
1	70	56.6	-13.4	68.3	-1.7
2	80	66.1	-13.9	77.8	-2.2
3	90	79.5	-10.5	91.2	1.2
4	100	90.0	-10	101.7	1.7
5	110	96.0	-14	108.7	-1.3
6	120	102.1	-17.8	122.8	2.8
7	130	118.6	-11.4	130.3	0.3
8	140	126.2	-13.8	141.2	1.2
9	150	135.5	-14.5	148.2	-1.8
10	160	150.7	-9.3	161.4	1.4
11	170	158.8	-11.2	170.5	0.5
12	180	170.7	-9.3	181.4	1.4
13	190	178.5	-11.5	190.2	0.2
14	200	187.7	-12.3	199.4	-0.6
15	210	199.3	-10.7	211.0	1
16	220	209.9	-10.1	221.7	1.7
17	230	279.6	-10.4	231.3	1.3
18	240	229.4	-10.6	241.1	1.1
19	250	238.2	-11.8	249.9	-0.1
20	260	248.7	-11.3	260.4	0.4

1) 在 70~260℃测温区间内，使用 Butterworth 滤波器校正前的红外辐射测温装置，在测量标准红外辐射黑体时，平均测量温度误差为-11.89℃。使用 Butterworth 滤波器校正后的红外辐射测温装置，在测

量标准红外辐射黑体时，平均测量温度误差为 0.475℃。加入 Butterworth 滤波器后，平均红外辐射测量温度误差减小了 96%。

2) 校正后的系统由于大气环境红外辐射等干扰造成的测量误差基本控制在±2℃之间，不同范围的误差值也都在 2%的误差区间内，性能良好，可以在实际的实验和环境中进行进一步的应用。

3.2 激光软钎焊焊点温度测量

在激光软钎焊装置中，红外辐射测温光束从准直透镜进入，分别经过分光镜、全反射镜、胶合聚焦透镜作用于 InGaAs 光伏探测器，完成焊点的温度检测。使用该组合光路，如图 7 与图 8 所示，红外辐射测温视场完全作用于焊点，减小了大气及焊点周围电路板对辐射测温带来的误差影响^[20]。

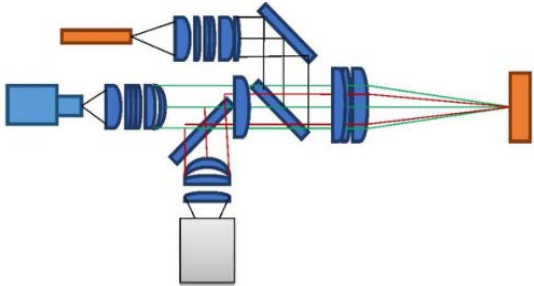


图 7 光路示意图

Fig.7 Schematic diagram of optical path

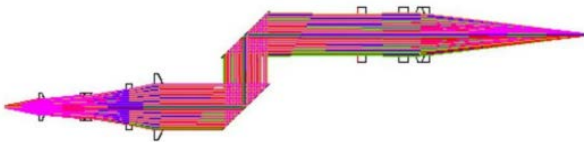


图 8 系统三维光路图

Fig.8 System 3D optical path diagram

如图 9 所示为激光软钎焊测温实验平台，将 InGaAs 光伏探测器探头装入激光软钎焊装置。

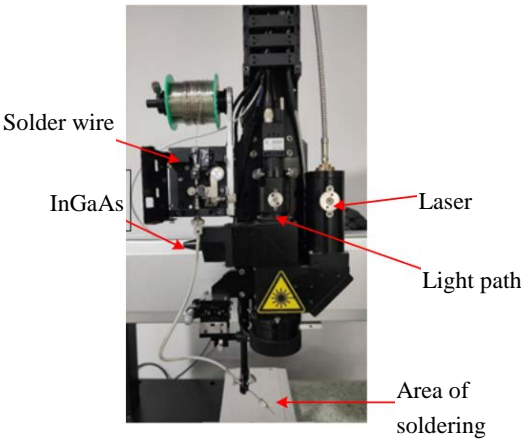


图 9 激光软钎焊测温实验平台

Fig.9 Laser soldering temperature test platform

在 0~500 ms 加工时间内, 将激光功率设置为 20%; 在 500~900 ms 加工时间内, 将激光功率设置为 30%。将热电偶固定于激光光束焦点, 通过激光光束加热热电偶, 将热电偶测量温度视为焊点真实温度, 使用红外辐射测温装置检测热电偶温度, 通过上位机自动记录绘制温度曲线, 如图 10。

根据实验数据得到结论: 激光软钎焊焊接过程中, 热电偶测得的真实温度值与红外辐射测温装置的偏差最大值为 4.6℃。在时间区间[0, 500]ms 内, 红外辐射测温装置检测温度与视为焊点真实温度的热电偶检测温度测量误差均处于 1.6%之内, 在时间区间[500, 900]ms 内, 温度测量误差均处于 1.8%之内。总体平均误差为 0.79%。

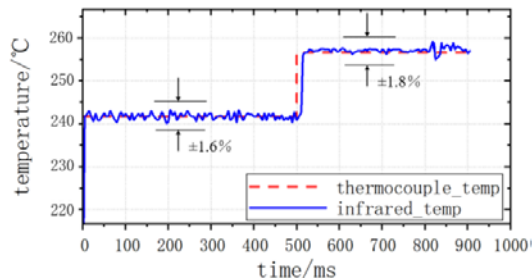


图 10 激光软钎焊焊点温度测量曲线

Fig.10 Laser soldering temperature test curves

4 结论

本文研制了一种用于激光软钎焊焊点温度测量的红外辐射测温装置, 通过 InGaAs 光伏探测器与光电转换电路将被测焊点的红外辐射强度转换为电信号; 设计通带 400 kHz 十阶的 Butterworth 低通滤波器, 降低了信号漂移和噪声带来的红外辐射测温误差, 提高了红外辐射测温数值的精度。在对标准红外辐射黑体炉的实际测量中, 在参考温度区间[70 260]℃ 的温度区间内, 测量误差基本处于 ±2℃ 之内, 最大相对误差小于 2%。在激光软钎焊焊接测试中, 以热电偶的温度作为准确温度, 在被测热电偶温度为 241.8℃ 情况下, 最大误差为 1.6%; 在被测热电偶温度为 255.4℃ 情况下, 最大误差为 1.7%, 整体平均误差小于 0.8%。

本文指出了用于激光软钎焊的红外辐射测温装置的精度主要取决于信号转换电路的设计和对噪声信号的滤波处理, 本文提出的装置通过设计合理的跨阻放大电路和 Butterworth 型滤波器可以精确地将光伏探测器的信号放大, 并消除探测器与电路引入的信号漂移与噪声。本设计适用于激光软钎焊系统以及各类工业加工过程非接触式测温。

参考文献:

- [1] 张丽丽, 孙树峰, 王茜, 等. 激光微纳连接技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, **59**(3): 0300003.
ZHANG Lili, SUN Shufeng, WANG Xi, et al. Research progress of laser micro-nano connection technology[J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2022, **59**(3): 0300003.
- [2] Adawiyah M A R, Syafiq H, Ammar M D, et al. The interfacial reaction between Sn-Ag-Cu (SAC)/Cu during laser soldering[J]. *Lasers in Engineering*, 2022(6): 51.
- [3] Alharbi A M, Othman M I A, Abd-Elaziz E M. 2-D analysis of generalized thermoelastic porous medium under the effect of laser pulse and micro temperature[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2021, **21**(9): 2150126.
- [4] Kim J O, Jung J P, Lee J H, et al. Effects of laser parameters on the characteristics of a Sn-3.5 wt. % Ag solder joint[J]. *Metals & Materials International*, 2009, **15**(1): 119-123.
- [5] HE Q, WEI H, CHEN J S, et al. Analysis of hot cracking during lap joint laser welding processes using the melting state-based thermomechanical modeling approach[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, **94**: 4373-4386.
- [6] Schmidt J, Rutz F, Wrl A, et al. Low dark current in mid-infrared type-II superlattice heterojunction photodiodes[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**: 378-381.
- [7] Torregrosa Penalva G, Asensio-López A, Ortega-González F, et al. PAE improvement and compensation of small-signal gain drift due to temperature on power amplifiers through active biasing[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, **38**(5): 389-392.
- [8] Vincent G, Guy L, Philippe R, et al. Improving the power line communication signal-to-noise ratio during a resistive load commutation[J]. *Journal of Communications*, 2009, **4**(2): 126-132.
- [9] Lee J M, Choi Y, Lee J R. Laser structural training, artificial intelligence-based acoustic emission localization and structural/noise signal distinguishment in a thick FCEV fuel tank[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022(6): 47.
- [10] Mahata R MD. Optimal design of fractional order low pass Butterworth filter with accurate magnitude response[J]. *Digital Signal Processing*, 2018, **72**: 96-114.
- [11] 张立东, 苗长云, 厉振宇, 等. 带式输送机本质安全型红外测温仪[J]. 红外技术, 2021, **43**(1): 89-95.
ZHANG Lidong, MIAO Changyun, LI Zhenyu, et al. Intrinsically safe infrared thermometer for Belt Conveyors[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(1): 89-95.
- [12] Colaizzi P D, OShaughnessy Susan A, Evett S R. Calibration and tests of commercial wireless infrared thermometers[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2018, **34**(4): 647-658.

- [13] Montambaux G. Generalized Stefan-Boltzmann Law[J]. *Foundations of Physics*, 2018, **48**(4): 395-410.
- [14] Cuenca J, Sobrino J A. Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(23): 4598-4602.
- [15] 邵秀梅, 龚海梅, 李雪, 等. 高性能短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2016, **38**(8): 629-635.
SHAO Xiumei, GONG Haimei, LI Xue, et al. Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors[J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(8): 629-635.
- [16] Colaizzi P D, O' Shaughnessy Susan A, Evett S R. Calibration and tests of commercial wireless infrared thermometers[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2018, **34**(4): 647-658.
- [17] 苏玉辉, 龚晓霞, 雷胜琼, 等. 噪声作为红外探测器可靠性评价的探讨[J]. *红外技术*, 2009, **31**(9): 509-512.
- SU Yuhui, GONG Xiaoxia, LEI Shengqiong, et al. Discussion of reliability evaluation on infrared photovoltaic detector by noise[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(9): 509-512.
- [18] 王长青, 李爱军, 王伟. Butterworth 滤波器在飞行控制系统设计中的应用[J]. *飞行力学*, 2009, **27**(1): 74-76, 96.
WANG Changqing, LI Aijun, WANG Wei. Application of butterworth filter to design of flight control systems[J]. *Flight Dynamics*, 2009, **27**(1): 74-76, 96.
- [19] Chavan M S, Agarwala R A, Uplane M D. Design and implementation of digital FIR equiripple notch filter on ECG signal for removal of power line interference[J]. *WSEAS Transactions on Signal Processing*, 2008, **4**(4): 221-230.
- [20] PAN D, JIANG Z, Maldague X, et al. Research on the influence of multiple interference factors on infrared temperature measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**: 10546-10555.