

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413634

基于结点热光效应的点热源非接触式温度传感器*

刘梅^{1,2}, 白鑫¹, 王嘉诚¹, 周小彤¹, 王志明¹

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444; 2. 智能光电系统感知及应用四川省高校重点实验室 达州 635000)

摘要:传统点热源温度测量方法包括热电偶、电阻温度计和红外测温等,但它们通常存在体积较大、响应速度较慢或难以实现微小区域精确测量的局限性。为此,设计并开发了一种基于光波导交叉结点和热光效应的温度传感器,实现了对小尺寸点热源的非接触式温度测量。采用3D打印法制备了不同形态的光敏树脂结点,激光照射在结点交叉处,结点将激光分散到其分支结构上;氧化铝陶瓷加热片作为点热源提供小范围恒定温度,利用可调压电源实现对其温度的调节。加热片散发的热量改变结点材料的折射率(即热光效应),从而改变其分支出射光强度,光强的变化通过分支末端的光电二极管实时检测。实验证实了该传感器的温度灵敏特性和线性响应特性。结果表明,该传感器在一定范围温度变化中(330℃~554℃)的测量精度优异,具有良好的稳定性和重复性。在465℃~554℃范围内,传感器具有良好的线性特性,检测灵敏度可达-9.4 mV/℃,传感器的重复性误差 δ_R 在1.41%~2.11%之间。该方案提供了一种结构简单、成本低的微纳点热源温度检测新方法,为微型化、高灵敏、非接触式温度传感器的设计提供了新的思路,在医疗保健、激光加工和3D打印等领域的温度监测方面具有很大的应用潜力。

关键词:光波导结点;温度传感器;点热源;热光效应;光电二极管

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A non-contact temperature sensor for tiny-point-heat source based on micro-junction thermo-optic effect

Liu Mei^{1,2}, Bai Xin¹, Wang Jiacheng¹, Zhou Xiaotong¹, Wang Zhiming¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Key Laboratories of Sensing and Application of Intelligent Optoelectronic System in Sichuan Provincial Universities, Dazhou 635000, China)

Abstract: Traditional temperature measurement methods for point heat sources include thermocouples, resistance temperature detectors (RTDs), and infrared thermometers. However, these techniques are often limited by their relatively large size, slow response time, or difficulty in achieving precise measurement in small areas. To address these limitations, a temperature sensor based on a photonic waveguide cross-junction and the thermo-optic effect is designed and developed, enabling non-contact temperature measurement of small-sized point heat sources. Photosensitive resin junctions with various morphologies are fabricated using 3D printing. A laser beam is directed at the cross-junction, which disperses the light into its branched structures. An alumina ceramic heating plate serves as the point heat source, providing a small-range, constant temperature, with adjustable temperature control via a variable power supply. The heat emitted from the source alters the refractive index of the micro-junction material (i.e., the thermo-optic effect), thereby changing the intensity of the light emitted from the branches. The change in light intensity is detected in real-time using a photodiode. Experimental results confirm the sensor's temperature sensitivity and linear response characteristics. The results show that the sensor exhibits excellent measurement accuracy within a small temperature range (330℃~554℃), with good stability and repeatability. In the temperature range of 465℃~554℃, the sensor shows a strong linear relationship, with a detection sensitivity of -9.4 mV/℃, and the repeatability error (δ_R) ranges from 1.41% to 2.11%. This scheme presents a novel method for temperature detection of micro-nano point heat sources with a simple structure and low cost, providing a new approach for the design of miniaturized, highly sensitive, and non-contact temperature sensors. The methodology exhibits substantial application potential specifically in temperature monitoring for healthcare,

收稿日期:2024-12-29 Received Date: 2024-12-29

* 基金项目:智能光电系统感知及应用四川省高校重点实验室开放课题(ZNGD2210)项目资助

laser processing, and 3D printing.

Keywords: optical waveguide junction; temperature sensor; point heat source; thermo-optic effect; photodiode

0 引言

在医疗保健、激光加工和3D打印等领域中,点热源温度传感器对疾病治疗、故障诊断、智能制造等至关重要^[1-2]。在激光诱导热疗(laser-induced thermotherapy, LITT)中,点热源温度测量能实时反映组织受热情况,精确控制温度避免组织炭化、气泡产生等不良现象,保障治疗安全与效果,还可通过热剂量评估辅助判断治疗进程。Descalides等^[3]成功研发基于实时体磁共振测温技术与特定算法的自动温度调节系统,通过猪腿肌肉体内实验,验证了系统对多激光探针温度调控的可行性,有效控制温度误差。但校准步骤耗时较长,在临床应用的便捷性上有待提升。在激光加工中,点热源温度测量有助于深入理解激光加工过程中的热传导机制和能量分布规律,从而为优化加工工艺参数提供关键依据。准确的温度测量能够直接反映加工区域的热状态,对于控制加工质量至关重要,如避免材料过热导致的变形、烧蚀、热影响区过大等问题,提高加工精度和表面质量^[4-6]。在3D打印中,对挤出机喷嘴温度的测量直接影响打印部件的机械性能与内部结构,精确测量有助于优化打印工艺、提升产品质量与可靠性。Sutopa等^[7]利用基于声子晶体工件(phononic crystal artifacts, PCA)的监测框架,通过在不同喷嘴温度下打印PCA并采集其超声响应,分析得出机械和光谱特性随温度的变化规律,证实可借此监测温度变化。

传统温度传感器如热电偶、热敏电阻和光纤传感器存在灵敏度不足、易受干扰、需接触测量或系统复杂等局限性^[8-10]。为此,提出一种基于光波导交叉结构^[11]和热光效应^[12-13]的新型传感方式。利用温度引起波导材料折射率的变化,通过检测波导分支出射光强度的变化实现对温度的传感^[14]。与传统传感器相比,这种方式响应速度快、抗电磁干扰强;结构简单,不需要使用光谱仪、解调器等设备;同时,非接触的方式也可以避免对点热源状态的干扰,特别适合小范围内温度变化的快速测量。

1 工作原理

1.1 光波导交叉结点光散射效应

目前纳米线凭借其小尺寸、对激光的强约束以及优良的波导性能等特征,已在微纳光学和光子学等领域引起广泛关注^[15-16]。科研人员发现,不规则纳米结点可以作为信号注入并分配的理想平台,用来研究传输和干涉现象^[17]。基于此提出,将光波导结点作为激光信号输入

和分配的平台,利用出射激光携带的信息进行传感检测。

单根波导对于侧面入射的光不具备有效的耦合能力,而在交叉波导的结点结构中,结点区域由于两根波导靠得非常近,波导间的电磁场相互作用增强,导致它们之间的倏逝场重叠,使得部分光能量能够通过侧面耦合进入波导^[18]。在结点区域,光场的模式与波导的传播模式产生了局部匹配,这种模式耦合效应促使光从结点进入波导^[19]。此外,交叉结构的几何形状和局部折射率的变化进一步影响光的传播路径,类似于形成了一个光学微腔的区域,如图1所示,增强了激光的耦合能力。总之,在交叉结构的结点处,光的传播条件发生了改变,激光能够通过侧面耦合进入波导并传播,即结点耦合光散射效应。

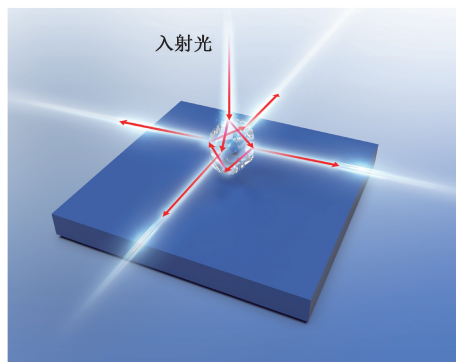


图1 光波导结点光散射效应示意图

Fig. 1 Diagram of light scattering effect at optical waveguide junctions

1.2 热光效应及灵敏度标定

热光效应是指波导材料的折射率随着材料中温度的变化而发生改变的物理现象。而热光系数是用来形容介质折射率随温度变化快慢的参数,可以用 dn/dT 来表示。热光系数的公式可以表示为^[20]:

$$\frac{dn}{dT} = - \left(\frac{\rho \partial n}{\partial \rho} \right)_{\tau} \gamma + \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\rho} \quad (1)$$

其中, γ 表示介质的热膨胀系数, ρ 表示介质的密度, $\left(\frac{\rho \partial n}{\partial \rho} \right)_{\tau} \gamma$ 表示因为温度的改变而导致的热膨胀及介质极化率的变化所引起的折射率的波动, $\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right)_{\rho}$ 表示因为介质密度的变化而引起的折射率改变。

灵敏度标定则是通过测量不同温度下光波导的输出信号强度与已知温度变化的关系,建立温度与信号输出之间的线性或非线性关系,从而得到光波导温度传感器的灵敏度^[21]。通过标定,能够将输出信号的变化量准确

转换为温度变化,进而实现温度的精确测量,即:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

(2)

1.3 传感器原理

此方案所设计的基于光波导交叉结构和热光效应的温度传感器,利用波导折射率随温度变化的特性实现精确测温,其结构如图 2(a)所示。传感器工作原理如图 2(b)所示。

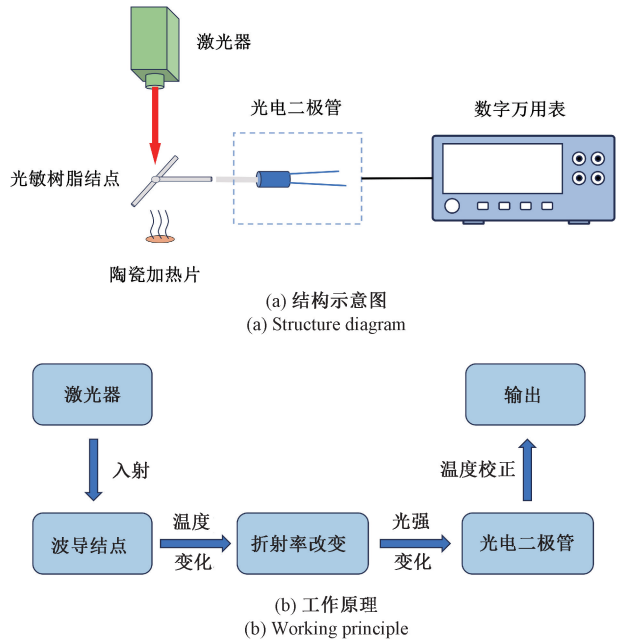


图 2 基于波导结点的点热源传感器

Fig.2 Point heat source sensor based on waveguide junctions

在波导结点处,垂直入射的激光通过侧面耦合进入波导并沿其传播。当外界温度变化时,波导材料的折射率发生改变,导致波导内光的耦合效率发生变化,进而引起波导端口出射光强度的变化。通过安装在波导端口的光电二极管,实时检测光强变化并转化为电信号,从而精确反映温度的动态变化。该传感器利用光波导的高灵敏度和抗干扰性,能够实现微小范围温度的非接触精确测量。

2 传感器制作与实验验证

2.1 结点制备

实验采用透明光敏树脂作为结点材料。光敏树脂具有高折射率、低吸收损耗和易处理特性,适用于制造小型光子器件,是光波导实验的理想材料。同时其具有较高的热光系数,用来制作温度传感器时灵敏度较高。用于制备结点的光敏树脂参数如表 1 所示。通过 3D 打印制作了十字型、T 型、X 型、Y 型 4 种不同形态的结点,直径 2 mm,长度 30 mm(角度分别为 90°、45°)。以 He-Ne 激

光器 (Thorlabs HNL150LB) 作为入射光源,波长为 632.8 nm,功率 15 mW。

表 1 光敏树脂基本参数

Table 1 Basic parameters of photosensitive resin

参数名	参数值
密度	1.09 g/cm ³
粘度	226 cps
折射率	1.5~1.54
热光系数	-1.5×10 ⁻⁴ ℃
热变形温度	50℃
拉伸强度	49.76 MPa
抗弯强度	65.84 MPa

2.2 结点效果验证

实验观察激光在波导结点中的耦合和传播情况,如图 3 所示。

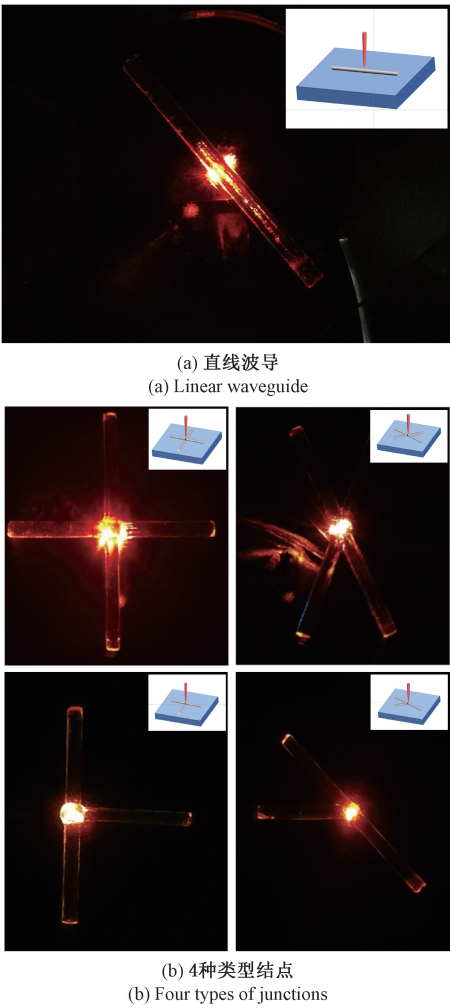


图 3 激光耦合效果

Fig.3 Laser coupling effect

如图3(a)所示,当激光束直接垂直聚焦到无结点直线波导上时,未观察到激光在其中传播,这是因为激光入射方向与波导轴向的夹角过大(90°),激光无法在其中以全反射的形式进行传播;而在激光照射到结点的情况下,如图3(b)所示,分别为激光照射到十字型、X型、T型、Y型4种结点上的耦合情况,结点的存在使激光中能够顺利耦合到波导中,因此能够在分支的末端观察到亮斑。

对于同一激光输入条件,每个分支末端的输出信号显示出不同的强度。提高入射激光的功率,分支末端的亮度也会明显增强,而直波导则没有变化。因此,结点可以作为激光与波导侧向耦合的媒介。这在后续的温度传感器制作中,降低了将激光器与波导进行对接的精准要求,这有利于降低操作难度以及传感器的复杂程度。

2.3 最佳激光强度范围确定

建立温度传感实验系统,系统光路中设置可调节滤光片,通过调节对激光的滤光比例改变结点上入射激光的强度。如图4所示。通过滤光片调节后的激光直接照射到光敏树脂结点上,在分支末端用PIN光电二极管(SGPIN42MR-R 环氧型)进行接收。

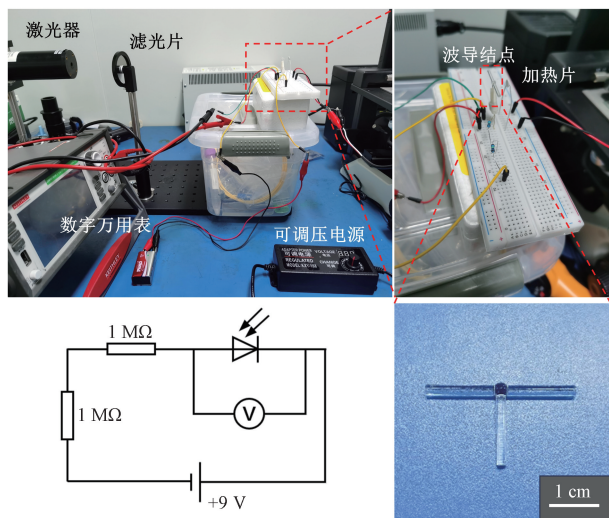


图4 温度传感实验系统及电路

Fig. 4 Temperature sensing experimental system and circuit

使用万用表直接测量光电二极管的电阻,验证其对光强变化的响应规律,并确定实验中最佳的入射光强范围。实验结果如图5所示,在滤光片对光强过滤11%~33%的范围内,光电二极管的电阻对入射光强变化响应明显,并且呈现很好的线性度。因此,后续实验中选用滤光比例为22%的激光作为入射光源,即采用11.7 mW的激光作为入射光源。

2.4 实验过程

如图4所示,采用氧化铝陶瓷加热片作为点热源。加热片直径为5 mm,使用3.5~12 V的可调电源为其单独供电。通过调节加热片的电压,改变热源的溫度。保

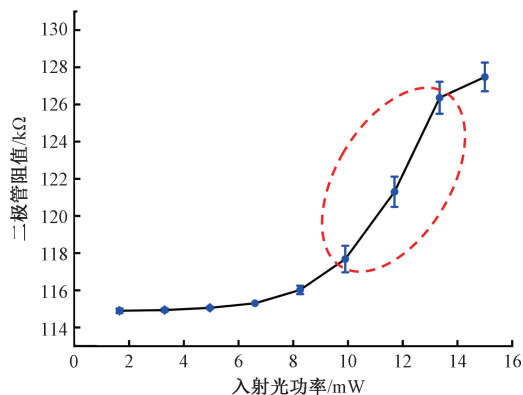


图5 光电二极管电阻与光照强度的关系

Fig. 5 Relationship between photodiode resistance and light intensity

持结点与加热片的距离恒定为8 mm。距离<8 mm时,加热片反射的激光会带来干扰,同时结点温度过高会超过材料的热变形温度导致变形;距离>8 mm时,测量的灵敏度会降低,如图6所示。将结点的分支与光电二极管对接并且密封在一起,确保光电二极管接收到的激光全部是通过结点耦合分配到分支上的。将光电二极管与2个阻值为1 MΩ的电阻串联在电路中,光电二极管反接在电路中,对其施加反向偏置电压。使用9 V直流电源为电路供电,数字万用表(Keithley DMM 7510)测量光电二极管的电压变化作为输出数据。为避免环境光线的干扰,本实验全程在黑暗环境中进行。实验温度为 $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$,环境相对湿度保持在 $45\% \pm 5\%$ 之间。

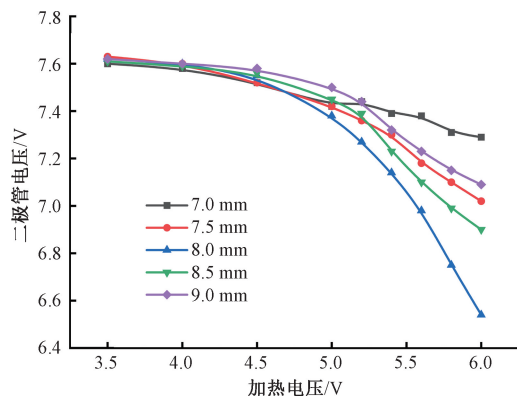


图6 不同距离下的传感曲线

Fig. 6 Sensing curves at different distances

为了检验不同形态结点对传感效果的影响,分别采用十字型、T型、X型、Y型结点进行实验,结果如图7所示。可以看出,T型结点对温度变化的响应最灵敏,因此后续实验均采用T型结点作为激光入射平台。另外,从图中还可以看出,T型和Y型结点分别比十字型和X型结点更灵敏,这是因为T型和Y型两种结点可视作十字

型结点和 X 型结点去掉一个分支后的部分。由于少了一个分支,结点部分暴露出的弧面面积增加,更多的激光能够耦合入分支中。

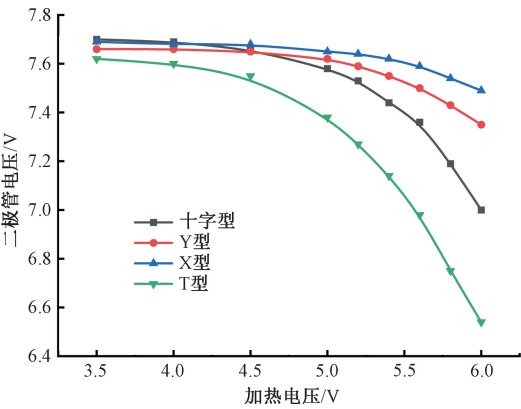
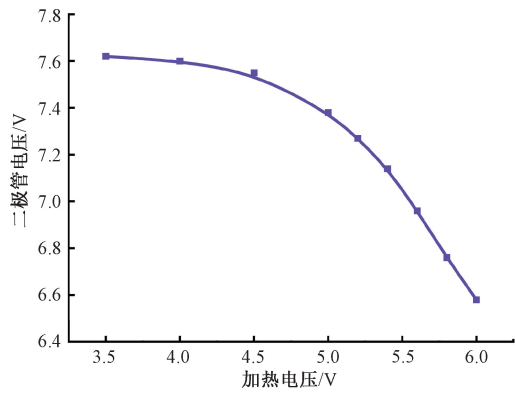


图 7 不同形态结点的传感曲线

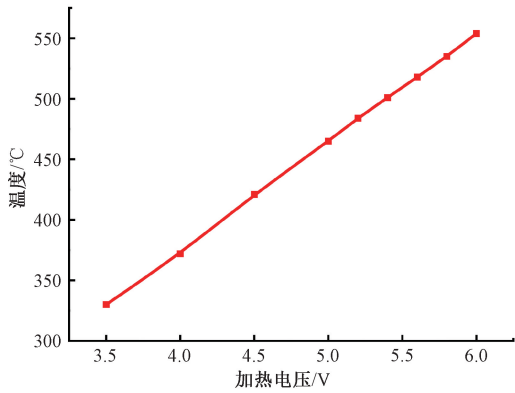
Fig. 7 Sensing curves of junctions with different shapes

3 结果分析与讨论

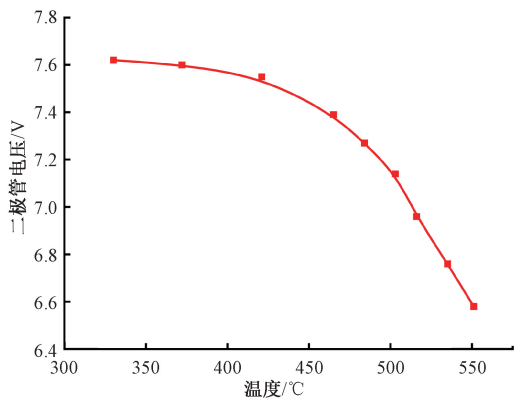
光电二极管两端电压随加热片电压和温度的变化关系如图 8 所示,加热电压每增加 0.5 V,记录一个实验数据。



(a) 光电二极管电压随加热电压变化关系
(a) Relationship between photodiode voltage and heating voltage variation



(b) 加热片温度与其加热电压关系
(b) The relationship between the temperature of the heating element and its heating voltage



(c) 光电二极管电压随温度变化关系
(c) Relationship between photodiode voltage and temperature variation

图 8 光电二极管电压变化曲线

Fig. 8 Voltage variation curve of photodiode

如图 8(a) 所示,加热片电压为 3.5 V 时,片上温度约为 330℃,结点处的温度过低,无法对温度变化作出明显响应;当加热片电压>5 V 后,片上温度高于 465℃,结点温度升高,能够对热源温度变化作出明显响应。并且当加热片电压>6 V 后,加热片的温度超过 550℃,结点的温度会超过材料本身的热变形温度,因此本实验中,加热片的最大电压设置为 6 V。如图 8(b) 所示,光电二极管两端电压与加热片电压呈良好的线性关系。在加热电压从 3.5 V 提高到 6 V 的过程中,加热片温度从 330℃ 均匀增加到 554℃。由此可以得到光电二极管电压与温度的直接关系,如图 8(c) 所示。

对 465℃~554℃ 范围内测得数据进行线性拟合,得到二极管两端电压与加热片温度的函数关系,即:

$$y = -0.0094x + 11.7841 \tag{3}$$

传感器的灵敏度为-9.4 mV/℃, $R^2 = 0.986$ 。如图 9 所示。

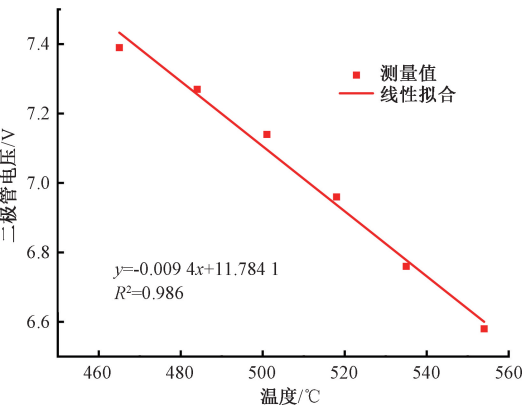


图 9 465℃~554℃ 内光电二极管电压与温度的线性拟合关系
Fig. 9 Linear fitting relationship between photodiode voltage and temperature within 465℃~554℃

进一步验证了传感器的响应速度和重复性。如图10所示,利用数字万用表记录每一次温度调节之后,传感器输出变化到稳定下来所需的时间。结果表明,传感器在环境温度变化后达到稳定值的90%所需时间 T_{90} 为1.4 s。优于文献[3]中的系统响应速度2 s。加热片升温过程在一定程度上降低了传感器的响应速度。但这一时间仍表明该传感器具有较快的动态响应能力,能够有效适应快速变化的温度环境。未来还可以通过选用热光系数更高的波导材料、优化光波导的结构和激光入射方式以及选用响应速度更快、灵敏度更高的光电二极管来进一步提高传感器的检测效率和精度。

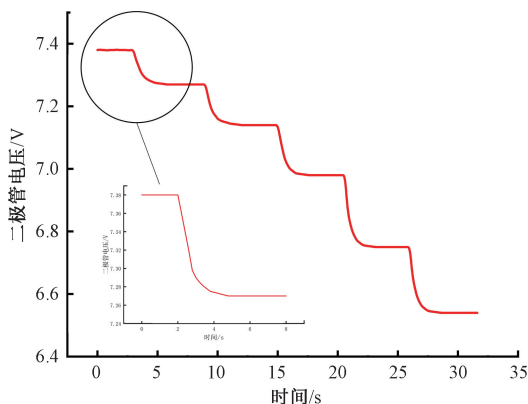


图10 传感器响应速度

Fig. 10 Response speed of sensors

随后通过多次实验,检验了传感器的重复性,如图11所示。

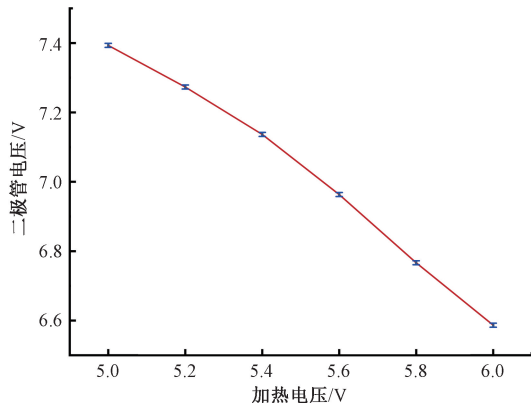


图11 重复性测试

Fig. 11 Repeatability test

根据重复性 δ_R 的计算公式,即:

$$\delta_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (4)$$

其中, $\sigma_{\max}$ 是各点标准差的最大值,各点标准差由贝塞尔公式计算得到:

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}')^2} \quad (5)$$

计算可得,传感器的重复性误差 δ_R 在1.41%~2.11%之间。

提出了一种非接触式点热源测量方法,由于实验条件限制,采取的结点和光电传感器的尺寸均比较大,因此测量范围、响应时间和灵敏度都受限。未来可通过微纳操作技术,制备微纳结点,将激光耦合入纳米线支路;同时配备相应的微纳光电传感器,提高测量方法的灵敏度、响应速度和测量范围,真正实现对微纳热源温度的精确测量。

4 结 论

以聚合物波导结点为对象,实验证明了结点对激光的耦合作用,在此基础上结合波导热光效应,设计并制作了一种非接触式温度传感器,实现了对小尺寸点热源温度的快速测量。测量温度范围为330℃~554℃,其中,在465℃~554℃范围内,传感器输出与温度变化呈现出良好的线性关系,其测量灵敏度可达-9.4 mV/℃。该传感器相较于传统的热电偶、热敏电阻式温度传感器,具有结构简单、灵敏度高、测量范围大等优点。此外,和光纤温度传感器相比,无需使用光谱仪、解调器等设备,降低了使用成本和复杂度,在小尺寸高温点热源的测量方面有很好的应用前景。

参考文献

- [1] JHA R, MISHRA P, KUMAR S. Advancements in optical fiber-based wearable sensors for smart health monitoring[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2024, 254: 116232.
- [2] 夏凤, 杨乃凡, 林倩如, 等. 基于微纳光纤谐振环的温度传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 224-232.
- XIA F, YANG N F, LIN Q R, et al. Research on the temperature sensor based on microfiber resonator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 224-232.
- [3] DESCLIDES M, OZENNE V, BOUR P, et al. Automatic volumetric temperature regulation during in vivo MRI-guided laser-induced thermotherapy (MRg-LITT) with multiple laser probes[J]. Computers in Biology and Medicine, 2025, 184: 109445.
- [4] 谢章伟, 张兴波, 徐哲, 等. 基于数字孪生的激光加工零件表面温度监控系统的构建[J]. 工程设计学报, 2023, 30(4): 409-418.

- XIE ZH W, ZHANG X B, XU ZH, et al. Construction of surface temperature monitoring system for laser machining parts based on digital twin [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(4): 409-418.
- [5] 李燕乐, 潘忠涛, 戚小霞, 等. 热处理工艺对激光熔覆 316L 温度场与应力场的影响规律[J]. 中国机械工程, 2024, 35(4): 666-677.
- LI Y L, PAN ZH T, QI X X, et al. Effect of heat treatment on temperature and stress distribution during laser cladding of 316L steels [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(4): 666-677.
- [6] 侯红玲, 吕瑞虎, 赵永强, 等. 碳纤维复合材料激光切割温度场研究[J]. 应用激光, 2021, 41(1): 141-147.
- HOU H L, LYU R H, ZHAO Y Q, et al. Research and analysis of temperature field in laser cutting of carbon fiber composite[J]. Applied Laser, 2021, 41(1): 141-147.
- [7] SUTOPA M S, SULTAN T, ROZIN E H, et al. Monitoring for the effects of extruder nozzle temperature on the micro-mechanical properties of 3D printed phononic artifacts [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 98: 337-350.
- [8] 王志超, 张志杰, 张秋宁. 一种基于 FPGA 的瞬态温度采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(19): 49-55.
- WANG ZH CH, ZHANG ZH J, ZHANG Q N. Contact temperature measurement system based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19): 49-55.
- [9] 刘熠, 王军华, 霍鹏, 等. 面向气象探空的微型热敏电阻设计及性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 258-264.
- LIU Y, WANG J H, HUO P, et al. Design and performance study of miniaturized thermistor for meteorological sounding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 258-264.
- [10] 杨玉强, 张钰颖, 高佳乐, 等. 一阶光学游标效应的全光纤温度传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 234-240.
- YANG Y Q, ZHANG Y Y, GAO J L, et al. All-fiber temperature sensor based on first-order optical Vernier effect [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 234-240.
- [11] 章喆, 李明宇, 肖泽华, 等. 基于空间光耦合系统的芯片温度传感器[J]. 光学仪器, 2023, 45(5): 79-86.
- ZHANG ZH, LI M Y, XIAO Z H, et al. The chip of temperature sensor based on spatial optical coupling system[J]. Optical Instruments, 2023, 45(5): 79-86.
- [12] XIE Y Q, CHEN L G, LI H J, et al. Polymer and hybrid optical devices manipulated by the thermo-optic effect[J]. Polymers, 2023, 15(18): 3721.
- [13] GE Y X, LIU Q Q, CHANG J H, et al. Optical fiber sensor for temperature measurement based on Silicon thermo-optics effect[J]. Optik, 2013, 124(24): 6946-6949.
- [14] PAN J SH, HUANG X G, HE Y M, et al. Fresnel-reflection-based fiber sensor for high-temperature measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(3): 035004.
- [15] 李丹然, 周康虎, 邢欢, 等. 二氧化硅微光纤与一维纳米材料集成器件的原理与应用[J]. 物理学进展, 2021, 41(5): 209-220.
- LI D R, ZHOU K H, XING H, et al. One-dimensional materials integrated SiO₂ microfiber device: Principle and applications[J]. Progress in Physics, 2021, 41(5): 209-220.
- [16] LYU CH J, LUO H Y, CUI L H, et al. Silver nanowires with ultrabroadband plasmon response for ultrashort pulse fiber lasers[J]. Advanced Photonics Research, 2022, 3(1): 2100184.
- [17] WOLFF M A, VOGEL S, SPLITTHOFF L, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors integrated with tantalum pentoxide waveguides [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17170.
- [18] ZHANG J B, KANG Y, GUO X, et al. High-power continuous-wave optical waveguiding in a silica micro/nanofibre [J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1): 89.
- [19] ROSSELLA F, BELLANI V, TOMMASINI M, et al. 3D multi-branched SnO₂ semiconductor nanostructures as optical waveguides [J]. Materials, 2019, 12(19): 3148.
- [20] DIEMEER M B J. Polymeric thermo-optic space switches for optical communications[J]. Optical Materials, 1998, 9(1/4): 192-200.
- [21] 陈胜硕, 胡杰祥, 李志, 等. 光学电压传感器温度响应特性分析与实验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 169-178.

CHEN SH SH, HU J X, LI ZH, et al. Analysis and experimental study on temperature response characteristics of optical voltage sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 169-178.

作者简介



刘梅, 2003 年于北京大学获得学士学位, 2006 年于中科院电子所获得硕士学位, 2010 年于加拿大西安大略大学获得博士学位, 现为上海大学副研究员, 主要研究方向为微纳操作/表征/应用、自供电传感器。

E-mail: mliu@shu.edu.cn

Liu Mei received her B. Sc. degree from Peking University in 2003, received her M. Sc. degree from Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences in 2006, and received her Ph. D. degree from University of Western Ontario in 2010. She is currently an associate researcher at Shanghai University. Her main research interests include micro-nano operation/characterization/application, and self-powered sensor.



白鑫, 2022 年于上海大学获得学士学位, 现为上海大学硕士研究生, 主要研究方向为微纳光学与传感。

E-mail: baixin@shu.edu.cn

Bai Xin received his B. Sc. degree from Shanghai University in 2022. He is currently a master student at Shanghai University. His research interest is micro-nano optics and sensing.



王志明 (通信作者), 1990 年于上海科技大学获得学士学位, 1998 年于上海大学获得硕士学位, 2003 年于上海大学获得博士学位, 现为上海大学教授, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: suwangzm@shu.edu.cn

Wang Zhiming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shanghai University of Science and Technology in 1990, received his M. Sc. degree from Shanghai University in 1998, and received his Ph. D. degree from Shanghai University in 2003. He is currently a professor at Shanghai University. His main research interest is intelligent detection technology.