

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.021

基于激光诱导击穿光谱的瞬态温度测量方法

廖文龙¹, 李哲², 杨玥坪¹, 唐博², 魏文赋²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 温度是影响材料力学性能的重要因素之一, 准确测量器件温度是认识材料在应力作用下其力学性能演变以及评估设备健康状态和寿命的重要方式。面向功率器件开关过程中焊接界面快速温变测量的需求, 传统方法存在时间分辨能力不足、难以测量瞬态温度的问题。文中基于激光诱导元素特征谱线强度与温度的密切相关性, 提出了一种微秒量级时间分辨能力的表面温度测量方法, 并建立了样品表面温度与光谱特性之间的定量关系。研究表明, 物质表面温度提升导致激光诱导等离子体光谱强度和信噪比增强, 且增强效果受到光谱采集延时和门宽影响。采用反向传播-人工神经网络 (back propagation-artificial neural network, BP-ANN) 和偏最小二乘 (partial least squares, PLS) 法对表面温度与光谱特性关系定量拟合并校准, 拟合模型线性相关性拟合度指标均大于 0.99。BP-ANN 拟合模型的拟合偏差更小, 其均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 为 2.582, 正确率为 98.3%。该方法为物体瞬态温度测量提供了一种有效手段, 对功率器件焊接界面健康状态的评估给予了有力支撑。

关键词: 激光诱导击穿光谱; 温度测量; 主成分分析; 时间分辨; 偏最小二乘 (PLS); 反向传播-人工神经网络 (BP-ANN)

中图分类号: TM836

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0202-06

0 引言

温度是影响材料力学性能的重要因素之一。在电力传输和配电系统及高频电力电子设备中, 准确测量器件温度是认识材料在应力作用下其力学性能演变以及评估设备健康状态和寿命的重要方式。研究表明, 通过测量功率器件的壳温即可实现对焊接界面的健康状态评估^[1-2]。功率器件在经受大幅温度变化时容易在焊料界面处产生应力积累而引起焊料界面老化脱落。焊料层的老化脱落会造成电气连接不可靠或者断路, 严重时影响器件正常运行甚至造成器件故障。然而功率器件的开关过程一般在纳秒到微秒的范围内。焊接界面温度变化较快, 测量十分困难。传统的温度测量方法分为接触式测量和非接触式测量两大类。接触式法通常面向材料和传感器的平衡温度, 易对材料表面产生干扰; 现有非接触式法多应用于静态基础工程, 存在时间分辨能力不高的问题^[3]。因此, 亟须发展一种高时间分辨能力的表面测温技术。

激光诱导击穿光谱 (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) 是一种快速、无损、非接触的元素分析技术^[4-6]。激光诱导等离子体的辐射过程中, 虽然部分高温带电粒子相互碰撞, 产生连续韧致辐射, 但是部分束缚电子跃迁至高能级, 使离子

或原子处于激发态, 退激发时辐射出对应元素的特征光谱。LIBS 技术是基于特征谱线的特性发展而来的一种诊断技术。特征谱线能够唯一表征某一特定元素, 且其强度和该元素粒子的密度和温度密切相关。LIBS 技术主要用于元素的识别和元素浓度的定量分析, 可以应用在金属材料分析^[7]、环境保护监测^[8]、地质勘探^[9]、医学诊断^[10]等领域, 同样 LIBS 技术也适合应用在功率器件中。因脉冲激光超短脉宽 (fs~ns 量级)、极小烧蚀斑点 (μm 量级)、光谱仪超高时间分辨 (≥ 2 ns) 及高频动态响应特性 (≥ 20 μs /帧), LIBS 技术尤其适用于高速过程物理量的测量。

研究表明, 当物质表面温度变化时, 激光诱导等离子体光谱特性也会随之改变, 提升物质温度将使得激光诱导等离子体光谱强度增强^[11-14], 其可能的机理是: (1) 物体表面开始烧蚀的临界值随着表面温度的升高而降低; (2) 随着材料表面温度的上升, 激光诱导等离子体与材料表面的相互作用也会增强; (3) 随着材料表面温度的升高, 材料表面吸收激光能量的能力也将提高。因此, 通过建立材料表面温度与 LIBS 光谱特性的定量关系, 可以实现物质表面温度超高时间分辨测量。

综上所述, 文中拟提出一种基于等离子体光谱特性的物体表面瞬态温度测量方法, 实现对功率器件开关过程中温度的准确测量。通过对温度增强光谱效应进行研究, 探明不同延时与门宽对光谱强

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52077182)

度和信噪比的影响规律;并对比研究反向传播-人工神经网络(back propagation-artificial neural network, BP-ANN)和偏最小二乘(partial least squares, PLS)法的校准效果。

1 实验平台和样品

1.1 实验平台

文中使用的实验装置如图1所示。激光器选用Quantel公司的Nd:YAG激光器,其输出的激光能量为50 mJ,波长为1 064 nm。激光输出后经镀银的全反射镜调整激光方向后,穿过平凸透镜(LA1608-YAG, $f=75$ mm, Throlabs)将激光聚焦至黄铜样品表面,激发黄铜样品产生等离子体。等离子体辐射穿过两个准直透镜(74-UV, 发散角小于 2° , JY-QP)和一个聚焦透镜(OLV50, $f=100$ mm, Zolix),将聚焦后的等离子体辐射耦合进光纤(FIB-600-DUV),并穿传输至光谱仪(IHR550, Horiba)。激光器和光谱仪由数字延迟发生器(DG535, 斯坦福研究系统公司)触发,并使用高速可见光子探测器(DET10A, Thorlab)记录。

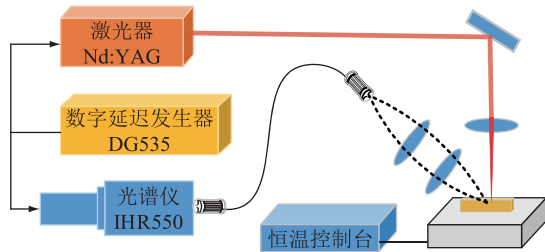


图1 LIBS实验装置

Fig.1 LIBS experimental setup

1.2 实验样品

实验样品采用尺寸100 mm×50 mm×5 mm的黄铜,其主要成分如表1所示。实验前对所用样品进行预处理,将样品打磨处理并用酒精清洗后,用激光预处理黄铜样品5次,以去除黄铜表面的氧化层和杂质。将经过预处理的黄铜样品放置在恒温控制台(BK946S, Bakon)上,使用热电偶表(TM902C, Specro, 误差 $\pm 1.5\%$)测量黄铜样品的表面温度,当加热至特定温度后,用功率约为 7×10^6 W/cm²的激光烧蚀,记录其等离子光谱。每采集30次光谱后,调节激光束方向,避免对相同部分反复烧蚀。在20~300 °C温度范围内,每隔20 °C采集一组光谱数据,每个温度采集30次,最后获得450组光谱数据。

2 实验结果

2.1 光谱数据预处理

光谱数据的采集和处理中,原始光谱信号易受

表1 黄铜样品的元素含量

Table 1 Element content of brass samples

元素	含量/%	元素	含量/%
Cu	63.50	Pb	0.08
Zn	35.77	P	0.01
Fe	0.15	其他	0.49

背景噪声干扰,导致信噪比降低,影响实验数据的准确性。为更有效地提取出样品表面的温度信息,对数据中的噪声和异常值进行检测和剔除,减弱干扰信息对光谱数据的影响。与原始谱线相比,降噪处理后谱线的光谱信噪比显著提升,改善了定量分析的可靠性。

为了减少实验过程中的误差,要进行多次重复测量以提高数据的可靠性。然而多变量重复组导致实验数据庞大,且包含大量冗余信息,易造成后续拟合困难。故在去噪处理后进行主成分分析(principal component analysis, PCA)进一步提升正确率,将数据压缩、降维,从而减少维度和冗余信息,并提取出更有用的特征^[15],以便后续数据分析和拟合。图2展示了不同数量主成分的保留效果。通过线性变换,将原有216维光谱数据降至6维,数据维度仅为原来的1/36,并且主成分的累积贡献率达到了99%,这表明前6个主成分已经涵盖黄铜光谱数据的大部分信息,大幅提高建模的效率。

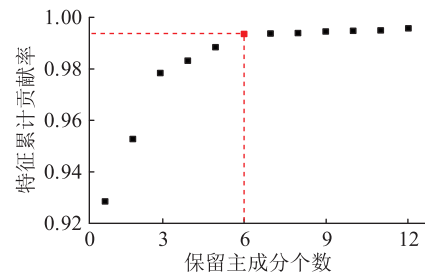


图2 保留不同主成分个数对应的累计贡献率

Fig.2 Accumulated contribution rates corresponding to retaining different number of principal components

2.2 温度增强效应

根据美国国家标准与技术研究院(national institute of standards and technology, NIST)的原子光谱数据库,在实验光谱数据中选择波长范围509~524 nm的Cu元素的谱线作为对象,图3展示了在不同表面温度下Cu元素的光谱强度变化。表2给出了Cu I 510.55 nm、Cu I 515.32 nm和Cu I 521.82 nm三种特征谱线的光谱数据表。随着表面温度升高,谱线整体的光谱强度也呈增强趋势。

在激光诱导等离子体过程中,发射光谱的强度与等离子体的电子温度密切相关^[16]。激光诱导等

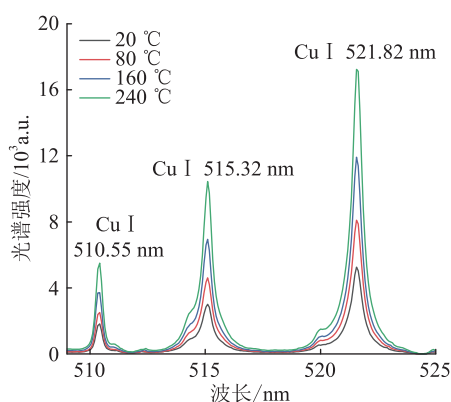


图3 黄铜在不同表面温度下的光谱强度
(延迟 0.9 μs, 门宽 3 μs)

Fig.3 Spectral intensity of brass at different surface temperatures (delay 0.9 μs, gate width 3 μs)

表2 NIST 中 Cu I 原子光谱线数据

Table 2 Data of Cu I atomic emission spectrum in NIST

λ_{ij}/nm	A_i/s^{-1}	E_n/cm^{-1}	g_i
510.55	2.0×10^6	30 783	4
515.32	6.0×10^6	49 935	4
521.82	7.5×10^6	49 942	6

离子体在局部符合热力学平衡条件, Cu 元素的数条特征谱线都处于相同的激发态, 采用 Boltzmann 斜线法对等离子体温度 T 进行定量地计算。联合 Cu I 515.32 nm 和 Cu I 521.82 nm 两条不同能级的特征谱线, 代入 Boltzmann 推导式(1):

$$\ln \frac{\lambda_{ij} I_{ij}}{g_i A_i} = \left(-\frac{1}{kT} \right) E_n + \ln \frac{N_0 h \times 10^7}{U^s} \quad (1)$$

式中: λ_{ij} 为元素在原子跃迁能级 i 和原子激发态 j 间的特征谱线波长; I_{ij} 为特征谱线的强度; k 为 Boltzmann 常数, 其值为 8.625×10^{-5} eV/K; g_i 为统计权重; A_i 为跃迁几率; E_n 为上能级的能量; N_0 为原子总密度; h 为普朗克常数; U^s 为碰撞时的平均能量损失。从表 2 中获取参数代入方程, 即可求得 $T^{[17]}$ 。

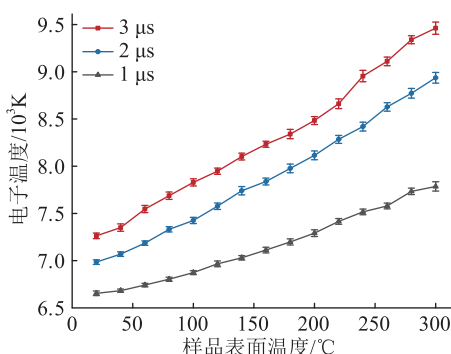


图4 不同表面温度下的等离子体电子温度
Fig.4 Plasma electron temperature at different surface temperatures

图 4 为不同表面温度下等离子体的电子温度。分析结果发现, 等离子体的电子温度也随着表面温度的增加而增加^[18]。随着样品表面温度升高, 材料表面的电子和分子振动增加, 使表面吸收激光部分能量。同时高温导致热能快速从激光聚焦区域扩散到周围, 降低了烧蚀阈值, 这更易激发等离子体继而增强光谱信号强度。

2.3 测量参数影响

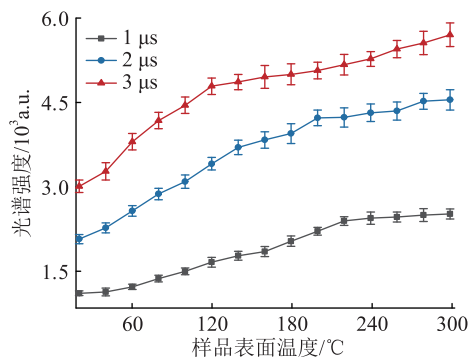
激光烧蚀样品表面后产生的等离子体存在时间极为短暂, 因此脉冲触发延迟时间和曝光门宽对特征光谱的分析及样品元素的检测至关重要^[19]。为讨论实验参数对光谱信号的影响规律, 文中分别采集了不同曝光门宽和不同脉冲触发延迟时间下的光谱信号, 并计算其信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)。图 5 展示了曝光门宽分别为 1 μs、2 μs、3 μs 时, Cu I 515.32 nm 的特征谱线强度和信噪比随温度变化的趋势。在表面温度为 20 °C 的实验条件下, 门宽为 1 μs 时 SNR 为 3.46、门宽为 3 μs 时 SNR 为 6.53。故随曝光门宽增加, 光谱强度呈显著上升趋势, 且光谱强度和信噪比的变化规律基本一致。当 SNR 较低时, 噪声可能会掩盖或降低信号的强度, 从而导致数据的误差和不确定性增大, 相对较高的 SNR 更有利于实验测量。

等离子体产生的初始阶段以韧致辐射为主, 致使光谱背景噪声强, 使得谱线信噪比相对较小。图 6 展示了延迟时间分别为 0.8 μs、1.2 μs 和 1.6 μs 下 Cu I 515.32 nm 特征谱线强度与信噪比随温度的变化趋势。在相同温度下, 延迟时间由 1 μs 逐渐增加, 谱线强度也随之呈增强趋势。同时随着样品表面温度升高, 信噪比逐渐增强, 光谱信号表现得更为清晰。

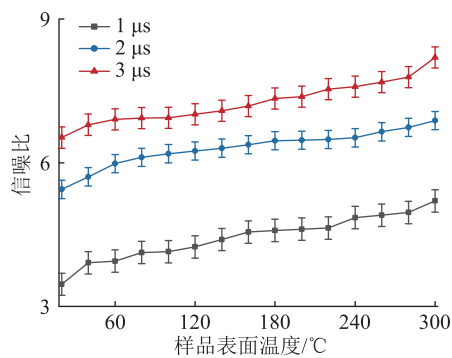
为有效展示谱线强度随温度变化的灵敏程度, 选取 Cu I 515.32 nm 处的特征谱线强度作不同温度范围的灵敏度分析。选取 20~100 °C、100~200 °C 和 200~300 °C 三个温度范围, 分析对应光谱强度变化率。结果如图 7 所示, 在 20~100 °C 温度范围中, 与门宽 1 μs 时相比, 在门宽 2 μs 和 3 μs 时, 光谱强度分别提高了 2.44 倍和 3.23 倍。对比 100~200 °C 和 200~300 °C 两个温度范围, 光谱强度呈现相同的变化规律。相同实验条件下, 门宽的增加使光谱强度变化率增大, 光谱变化更灵敏。当门宽相同时, 随着温度持续升高, 高温区域的光谱强度变化率明显减小。

2.4 表面温度校准

由于光谱强度和信噪比对样品的表面温度较



(a) 不同门宽条件下温度对Cu I 515.32 nm 谱线光谱强度的影响



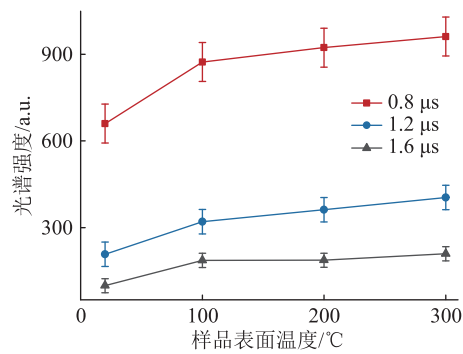
(b) 不同门宽条件下温度对Cu I 515.32 nm 谱线信噪比的影响

图5 不同门宽下温度对谱线Cu I 515.32 nm 的光谱强度和信噪比的影响

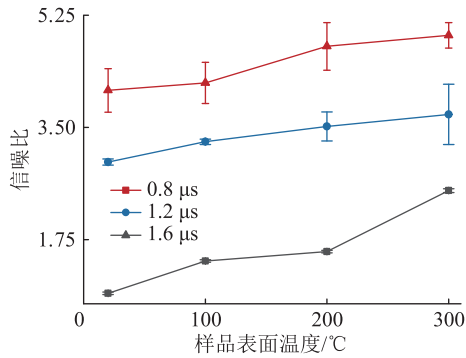
Fig.5 Effect of temperature on spectral intensity and signal-to-noise ratio of the spectral line Cu I 515.32 nm at different gate widths

敏感,因此开发一种表面温度测量法。实验采集的光谱数据去噪处理后采用PCA对光谱数据进行降维。将光谱数据按照4:1随机分组,用于建立训练集模型和预测集模型。文中分别采用BP-ANN和PLS对光谱强度和温度的对应关系进行拟合。以线性相关性拟合度 R_{R2} 、均方根误差(root mean squared error, RMSE) R_{RMSE} 和分类正确率 R_c 等3个指标对模型性能评估。其中, R_{R2} 表示拟合结果中预测值和真实值间的相近度,其值越接近1说明模型的拟合效果越好; R_{RMSE} 表示真实值与预测值之间的偏差程度,其值越小说明偏差越小。

BP-ANN通过多层次的神经元连接来实现对输入和输出变量之间的映射关系建模^[20]。将预处理的光谱强度归一化处理后,随机选取其中360组光谱数据作为模型的训练集,建立3层人工神经网络模型,训练次数设置为1000次,精度为0.001,学习率为0.01。剩余90组数据作为预测集,对比模型预测结果和实际结果评估模型的准确度。利用建立的温度模型对预测集进行拟合,图8(a)展示了测试集的拟合结果,测试集 R_{R2} 为0.999, R_{RMSE} 为2.582, R_c 达到98.3%,表明BP模型具有良好的准确性和



(a) 不同延迟时间下温度对Cu I 515.32 nm 谱线光谱强度的影响



(b) 不同延迟时间下温度对Cu I 515.32 nm 谱线信噪比的影响

图6 不同延迟时间下温度对Cu I 515.32 nm 谱线的光谱强度和信噪比的影响

Fig.6 Effect of temperature on spectral intensity and signal-to-noise ratio of the Cu I 515.32 nm spectral line at different delay times

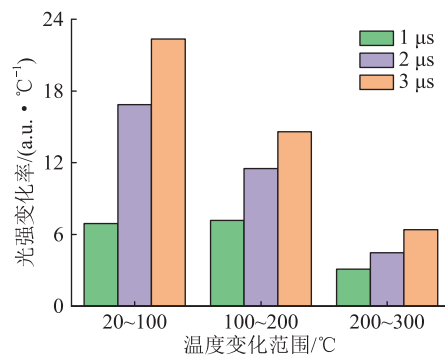


图7 不同温度范围温度灵敏度变化

Fig.7 Temperature sensitivity changes in different temperature ranges

稳定性。文中实验还采用PLS对多变量之间的复杂关系建模^[21],利用全部组光谱数据作为自变量,温度作为因变量,拟合光谱强度和温度之间的关系。图8(b)为PLS模型的拟合结果,预测集 R_{R2} 为0.991, R_{RMSE} 为8.165, R_c 达到83.3%。从两种模型的拟合结果可以得出光谱强度和样品表面温度有着强相关性。相较于PLS模型,BP模型更适合处理非线性多变量的光谱数据,其正确率更高,拟合偏差更小。

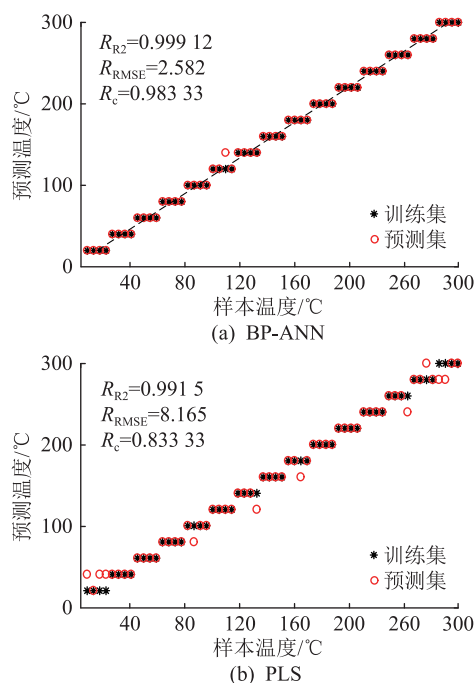


图8 两种表面温度校准拟合方法的拟合结果
Fig.8 Fitting results of two surface temperature calibration and fitting methods

3 结论

文中基于物体表面温度与激光诱导等离子体光谱的相关性,提出了一种微量量级时间分辨的物体表面瞬态温度测量方法。根据实验结果得到如下结论。

(1) 光谱强度和信噪比随着样品表面温度升高而升高。当物体表面温度升高时,表面材料烧蚀阈值降低,更易激发等离子体,且产生等离子体的电子温度更高,导致光谱信号得到增强。

(2) 延长光谱采集时间和门宽可以一定程度提高光谱强度与信噪比,可以通过优化延时和门宽优化光谱信号质量。

(3) 对比BP-ANN与PLS校准模型可知,通过BP-ANN法得到的校准模型更好,其 $R_{R2} > 0.99$, R_{RMSE} 为2.582, R_c 为98.3%。

参考文献:

[1] 赵旭州,朱戈,吴馨.基于壳温的IGBT模块键合引线疲劳寿命预测[J].高压电器,2017,53(7):167-173.
ZHAO Xuzhou, ZHU Ge, WU Xin. Fatigue life prediction of bonding wires in IGBT modules based on case temperature[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 167-173.

[2] 刘人宽,李辉,于凯,等.焊接型IGBT器件封装状态监测方法分析[J].电工技术,2022(15):71-78,82.
LIU Renkuan, LI Hui, YU Kai, et al. Analysis of package condition monitoring method of wire-bonded IGBT devices [J]. Electric Engineering, 2022(15): 71-78, 82.

[3] CHEN J Y, WANG W J, JIN P F, et al. Thermo-mechanical analysis of strength degradation of 30SiMn₂MoVA Gun barrel material during continuous shooting[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139: 106438.

[4] 何小勇.基于高重频激光剥离-火花诱导击穿光谱的合金元素定量分析技术研究[D].广州:华南理工大学,2020.
HE Xiaoyong. Studies on the quantitative elemental analysis technique based on high repetition rate laser-ablation spark-induced breakdown spectroscopy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[5] LIU Y C, ZHOU B B, WANG W L, et al. Insertable, scabbarded, and nanoetched silver needle sensor for hazardous element depth profiling by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. ACS Sensors, 2022, 7(5): 1381-1389.

[6] GUO L B, ZHANG D, SUN L X, et al. Development in the application of laser-induced breakdown spectroscopy in recent years: a review[J]. Frontiers of Physics, 2021, 16(2): 22500.

[7] 段家振.基于激光诱导击穿分析的高压输电线路金属污染物在线检测方法[J].电瓷避雷器,2023(3):60-67.
DUAN Jiazhen. On-line detection method for metal pollutants of high voltage transmission line based on laser-induced breakdown analysis[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(3): 60-67.

[8] POGGIALINI F, CAMPANELLA B, PALLESCHI V, et al. Graphene thin film microextraction and nanoparticle enhancement for fast LIBS metal trace analysis in liquids[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2022, 194: 106471.

[9] DONG M R, WEI L P, GONZÁLEZ J J, et al. Coal discrimination analysis using tandem laser-induced breakdown spectroscopy and laser ablation inductively coupled plasma time-of-flight mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2020, 92(10): 7003-7010.

[10] WEI H Y, ZHAO Z, LIN Q Y, et al. Study on the molecular mechanisms against human breast cancer from insight of elemental distribution in tissue based on laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. Biological Trace Element Research, 2021, 199(5): 1686-1692.

[11] WANG Q Y, CHEN A M, LIU Y T, et al. Comparison of emission signals for femtosecond and nanosecond laser-ablated Cu plasmas by changing the distance from focusing-lens to target-surface at different target temperatures [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2021, 185: 106302.

[12] LEDNEV V N, GRISHIN M Y, SDVIZHENSII P A, et al. Sample temperature effect on laser ablation and analytical capabilities of laser induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2019, 34(3): 607-615.

[13] ZHANG D, CHEN A M, WANG Q Y, et al. Influence of target temperature on H alpha line of laser-induced silicon plasma in air[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(8): 3305.

[14] 郭连波,牛雪晨,张猛胜,等.激光诱导击穿光谱技术应用研究进展(特邀)[J].光子学报,2023,52(3):0352104.
GUO Lianbo, NIU Xuechen, ZHANG Mengsheng, et al. Analysis of the application progress in laser-induced breakdown

- spectroscopy;a review (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023,52(3):0352104.
- [15] 文大鵬,梁西銀,蘇茂根,等. 激光诱导击穿光谱技术结合 PCA-PSO-SVM 对矿石分类识别 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021,58(23):2314006.
- WEN Dapeng, LIANG Xiyin, SU Maogen, et al. Classification of ores using laser-induced breakdown spectroscopy combined with PCA-PSO-SVM [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021,58(23):2314006.
- [16] 邱苏玲,李安,王宪双,等. 基于激光诱导击穿光谱的矿石中铁含量的高准确度定量分析 [J]. *中国激光*, 2021,48(16):1611002.
- QIU Suling, LI An, WANG Xianshuang, et al. High-accuracy quantitatively analysis of iron content in mineral based on laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021,48(16):1611002.
- [17] 刘焯坤. 激光诱导击穿土壤重金属光谱增强及定量分析方法研究 [D]. 太原:中北大学, 2022.
- LIU Yekun. Study on spectral enhancement and quantitative analysis of heavy metals in soil by LIBS [D]. Taiyuan:North University of China, 2022.
- [18] 林晓梅,钟磊,林京君. 样品温度对双脉冲激光诱导 Al 等离子体特征参数的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018,55(2):021401.
- LIN Xiaomei, ZHONG Lei, LIN Jingjun. Effect of sample temperature on characteristic parameters of double-pulse laser induced Al plasma [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018,55(2):021401.
- [19] 公正. 金属熔融过程中温度对 LIBS 定量分析影响的研究 [D]. 长春:长春工业大学, 2022.
- GONG Zheng. Effect of temperature on LIBS quantitative analysis in metal melting process [D]. Changchun:Changchun University of Technology, 2022.
- [20] 潘立剑,陈蔚芳,崔榕芳,等. 基于激光诱导击穿光谱与径向基函数神经网络的铝合金定量分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020,57(19):193002.
- PAN Lijian, CHEN Weifang, CUI Rongfang, et al. Quantitative analysis of aluminum alloy based on laser-induced breakdown spectroscopy and radial basis function neural network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020,57(19):193002.
- [21] 杨彦伟. 激光诱导击穿光谱铝土矿快速分选与定量检测方法研究 [D]. 太原:中北大学, 2022.
- YANG Yanwei. Study on rapid separation and quantitative detection method of bauxite in laser-induced breakdown spectroscopy [D]. Taiyuan:North University of China, 2022.

作者简介:



廖文龙

廖文龙(1989),男,硕士,工程师,从事变压器多物理场仿真及故障诊断工作(E-mail: 1037194862@qq.com);

李哲(2001),女,硕士在读,研究方向为等离子体应用;

杨玥坪(1997),男,硕士,工程师,从事电网设备在线监测及故障诊断工作。

Transient temperature measurement based on laser-induced breakdown spectroscopy

LIAO Wenlong¹, LI Zhe², YANG Yueping¹, TANG Bo², WEI Wenfu²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Temperature plays a crucial role in influencing the mechanical properties of materials. Accurately measuring the temperature of devices is essential for understanding the evolution of their mechanical properties under stress and evaluating their health and lifespan. However, traditional methods encounter challenges in measuring transient temperatures and lack sufficient time-resolution capability, particularly when it comes to the rapid temperature changes at the solder interface during the switching process of power devices. In this paper, based on the close correlation between the intensities of the characteristic spectral lines of the laser-induced elements and the temperatures, a method of measuring the surface temperatures with the time-resolved capability of the order of microsecond is proposed, and a quantitative relationship between the surface temperatures of the sample and the spectral characteristics is established. The findings demonstrate that an increase in the surface temperature of the material results in enhanced intensity and signal-to-noise ratio of laser-induced plasma spectra. This enhancement is influenced by the spectral acquisition delay and gate width. To establish a quantitative relationship between surface temperature and spectral properties, back propagation-artificial neural network (BP-ANN) and partial least squares (PLS) are employed for fitting and calibration. The fitted models can achieve linear correlation coefficient indexes exceeding 0.99. Notably, the BP-ANN fitted model exhibits a small fitting bias, with a root mean squared error (RMSE) of 2.582 and a correctness rate of 98.3%. The method provides an effective means for transient temperature measurement of objects and gives a strong support for the assessment of the health status of the soldering interface of power devices.

Keywords: Laser-induced breakdown spectroscopy; temperature measurement; principal component analysis; time resolution; partial least squares (PLS); back propagation-artificial neural network (BP-ANN)

(编辑 李栋)