

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615103

多基底反射的 PCBA 透明涂层光谱共焦 微米级测量方法研究*

刘夏丽, 邓耀华, 李博能

(广东工业大学机电工程学院 广州 510006)

摘要:针对印刷电路板组件(PCBA)透明涂层因基底反射特性差异引起的光谱谱形畸变,以及传统算法易出现漏检、峰位漂移及测量失准等问题,基于光谱共焦测量原理,阐明了基底材质与表面外观对反射光谱的影响规律,分析了多基底反射条件下的峰位偏移机理,并提出面向峰位偏移抑制的透明涂层双界面稳健定位的方法框架。首先,通过滑动分位数基线校正抑制残余基线漂移与噪声底部负值,然后利用萨维茨基-戈莱(SG)滤波降低高频噪声并保持峰顶形态与峰位稳定,并结合双峰分割约束下的局部高斯拟合,实现谱形差异显著条件下的双界面峰值精确定位,最终通过距离-像素映射与折射率修正得到几何厚度。在 5 类典型基底样本上开展重复性测试,实验结果表明,各测点厚度结果的相对标准差(RSD)介于 0.34%~1.18%。其中,样本 3 和 4 所有测点 RSD 均低于 0.6%,RSD 均值分别为 0.46% 和 0.36%;样本 1、2 和 5 的 RSD 均值分别为 0.89%、0.83% 和 0.93%,所有测点重复测量极差为 0.82~3.59 μm ,整体保持 μm 级重复性。对比 LS225 涂层测厚仪,所有测点的绝对误差均小于 5 μm ,相对误差均小于 5%。研究表明,该方法具备微米级精度与高重复性,为多基底反射的 PCBA 透明涂层厚度在线测量提供了可靠的技术支撑。

关键词: 多基底反射;透明涂层;光谱共焦;厚度测量;微米级

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Research on the micrometer-scale chromatic confocal thickness measurement method for transparent coatings on PCBAs under multi-substrate reflection

Liu Xiali, Deng Yaohua, Li Boneng

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To address the spectral distortion of printed circuit board assembly (PCBA) transparent coatings caused by differences in substrate reflection characteristics, as well as issues such as missed detection, peak shift, and inaccurate measurement in traditional algorithms, this article investigates the problem based on the chromatic confocal measurement principle. The influence of substrate material and surface appearance on the reflected spectrum is clarified, and the mechanism of peak-position shift under multi-substrate reflection conditions is analyzed. A robust dual-interface localization framework for transparent coatings is proposed to suppress peak-position drift. First, sliding quantile baseline correction is used to suppress residual baseline drift and negative values at the noise floor. Then, the Savitzky-Golay (SG) filtering is used to reduce high-frequency noise while maintaining the peak shape and peak position stability. Combined with local Gaussian fitting under dual-peak segmentation constraints, the method accurately locates the two peak positions even when spectral shapes differ significantly. Finally, the geometric thickness is obtained through distance-pixel mapping and refractive index correction. Repeatability tests are conducted on five types of typical substrate samples. The experimental results show that the relative standard deviations (RSD) of thickness results at each measuring point range from 0.34% to 1.18%. Among them, the RSD of all measuring points of sample 3 and sample 4 is lower than 0.6%, with average RSD values of 0.46% and 0.36%, respectively. The average RSD values of sample 1, sample 2, and sample 5 are 0.89%, 0.83%, and 0.93%, respectively. The repeated-measurement range of all measurement points is 0.82~3.59 μm , indicating overall micron-level repeatability. Compared with

收稿日期: 2026-04-03 Received Date: 2026-04-03

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52175457)、广东省科技计划项目(2024A0505090020)、东莞市重点领域研发项目(20221200300042)资助

the LS225 coating thickness gauge, the absolute error of all measurement points is less than 5 μm , and the relative error is less than 5%. This study shows that the proposed method achieves micron-level accuracy and high repeatability, providing reliable technical support for online thickness measurement of PCBA transparent coatings under multi-substrate reflection.

Keywords: multi-substrate reflection; transparent coating; chromatic confocal; thickness measurement; micrometer-scale

0 引 言

随着电子制造向高密度、高可靠方向发展,印刷电路板组件(printed circuit board assembly, PCBA)表面透明防护涂层(如三防漆)的厚度控制成为影响产品电气性能与长期可靠性的关键因素^[1-3],因此涂层厚度的高精度、高效率、非破坏性测量具有重要意义。随着智能制造与质量追溯要求的提升,产线对涂层厚度的在线批量检测提出了更高需求:既要覆盖多型号、多工艺、多点位的快速测量,又要在复杂器件边缘、焊点爬坡区域等微小位置保持足够的空间分辨率与重复性。

目前,PCBA 表面透明防护涂层的厚度测量主要依赖于传统手工测量,湿膜测厚适用于未固化阶段,属接触式且易污染,且仅能估计湿膜厚度,难以表征固化后的干膜真实厚度;涡流涂层测厚仪^[4-5]虽可用于固化后检测,但同样为接触式,其精度易受基底材料差异影响,自动化与快速检测能力受限;金相切片^[6]为破坏性方法,效率低、难以用于在线或全检。尽管激光三角等非接触光学方法在制造现场广泛应用,但应用于透明涂层时易发生穿透与界面杂散反射,导致上表面定位不准,难以获得可靠厚度结果。

近年来,针对透明材料的厚度测量,基于共焦原理的光学测量因具备微米级轴向分辨能力而受到广泛研究^[7-8]。黄贺等^[9]采用 Y 型光纤实现光路耦合与系统小型化,并引入衍射混合色散结构,设计了新型光谱共焦系统,量程达到 2.1 mm。Liu 等^[10]针对光源光谱不均和探测器响应不一致导致的波形畸变,提出一种光谱特性补偿算法,并配合分段曲线校准算法,实现了位移测量均方根误差小于 0.1 μm 的高精度检测。李春艳等^[11]针对动态测量时抖动引起的数据漂移,提出抖动补偿算法,使熔融石英玻璃测厚相对标准偏差降至 0.29%,有效提升光谱共焦在工业环境下的测量稳定性。此外,光谱共焦技术还应用到了精密加工测量领域,高峰等^[12]利用光谱共焦位移传感器实现了滚珠螺母内腔结构尺寸的测量,陈彦宇等^[13]采用光谱共焦传感器获取螺纹轴截面的轮廓曲线,开发了螺纹牙形畸变补偿算法,实现钻杆螺纹参数的测量与评价。

光谱共焦技术的研究主要聚焦于高精度色散结构设计及稳健信号处理算法的开发^[14-15]。Lu 等^[16]提出了一种基于线性插值的重心算法,通过对离散光谱数据进行局部特征增强,有效降低了算法对采样频率的依赖,提升

了共焦测量的重复性与绝对精度。Li 等^[17]引入小波阈值去噪结合自适应优化算法,成功抑制了复杂测量环境下的高频随机噪声,为解决长径比大、信号弱的复杂测量场景提供了参考。文献[18]针对彩色共焦显微镜研究了一种快速高斯拟合算法,在保证轴向分辨率的同时显著提升了峰值提取速度,以满足在线检测对实时性的要求。面对信号畸变及背景干扰严重的严苛环境,Zhao 等^[19]引入了广义互相关算法进行波长提取,利用信号间的相关性而非单一几何特征定位峰值,在低信噪比环境下展现出更强的抗噪性与算法稳定性。

现有光谱共焦测厚研究多以玻璃、透镜等高反射、低散射的光学元件为对象,测量界面清晰,谱形相对稳定。然而,复杂工业场景中具有异质基底(不同材质、表面外观及反射特性)的透明涂层检测,相关研究较少。基底反射特性的差异会引起反射光谱谱形畸变,进而导致传统滤波与峰值提取算法在多基底条件下易出现漏检、峰位漂移及定位不稳定等问题。针对上述问题,本文在分析不同基底反射光谱特性及峰位偏移机理的基础上,提出了面向峰位偏移抑制的透明涂层双界面稳健定位的方法:通过滑动分位数基线校正抑制基线漂移,采用萨维茨基-戈莱(Savitzky-Golay, SG)滤波降低高频噪声,并结合双峰检测与局部窗口约束下的高斯拟合实现双界面峰值精确定位,从而提高复杂基底条件下的双界面识别稳定性与厚度测量可靠性。

1 光谱共焦透明涂层测厚原理与基底反射谱形分析

1.1 光谱共焦透明涂层双界面测厚原理

光谱共焦位移/厚度测量的基本原理是:利用色散物镜的轴向色差建立“波长-轴向位置”的一一映射关系^[20],通过出射光纤端面实现共焦空间滤波,使不同轴向位置的表面反射在光谱域表现为不同波长(或像素)位置的峰值响应。这一映射关系如式(1)所示。

$$z = f(\lambda) \quad (1)$$

其中, z 为被测表面的轴向位置; λ 为对应的聚焦波长; f 为波长-轴向位置映射函数。考虑光谱仪以像素 p 采样输出强度序列 $I(p)$,用 g 表示像素-轴向位置映射函数,通过像素-波长标定 $\lambda = \lambda(p)$ 得到如式(2)所示的等效像素域标定关系:

$$z = g(p) = f(\lambda(p)) \quad (2)$$

针对透明涂层(如PCBA三防漆)的测厚场景,待测样品被放置在色散测头的有效色散区间内,第1界面(空气-涂层界面)与第2界面(涂层-基底界面)分别会对特定波长分量实现最佳聚焦并产生较强的反射光。反射光沿原光路返回,经光纤耦合器进入出射光纤,出射光纤端面等效于共焦孔,仅允许在界面处聚焦的回波有效通过;其余离焦反射光在共焦滤波作用下能量极弱,可近似忽略。最终,光谱仪接收回波光谱信息并形成反射光谱曲线,通过峰值定位算法得到对应上下界面的峰值像素位置 p_1, p_2 。依据已标定的像素-距离映射关系,可分别求得上下表面的轴向位置:

$$\begin{cases} \hat{z}_1 = f(\lambda(p_1)) \\ \hat{z}_2 = f(\lambda(p_2)) \end{cases} \quad (3)$$

两者差值给出涂层的轴向光学等效厚度:

$$\Delta \hat{z} = |\hat{z}_2 - \hat{z}_1| \quad (4)$$

像素-距离映射关系通常在空气中标定, $\Delta \hat{z}$ 与涂层的物理厚度 t 之间需要考虑折射率影响,本文采用常用的一阶折射率修正形式:

$$\hat{t} = \frac{\Delta \hat{z}}{n} \quad (5)$$

其中, n 为涂层在工作波段内的等效折射率(近似为常数),具体取值及不确定度分析见3.1节。在近似法向入射、涂层均匀且色散可忽略、上下界面双峰可分辨的假设下,上述原理即可实现涂层厚度 t 的解算。

1.2 多基底反射条件下的谱形差异分析

PCBA三防漆等透明涂层的光谱共焦测厚依赖于第1界面与第2界面在光谱域的稳定可分辨性。然而基底区域通常同时包含不同颜色油墨阻焊、丝印以及金属焊盘等多种材料与表面形态,其反射率谱特性与散射/镜面成分差异显著,使得第1界面峰与第2界面峰的幅值比、峰宽以及局部信噪比在不同基底之间呈现强烈波动,直接导致基于固定阈值、固定峰显著性及单一平滑尺度的传统找峰方法稳定性下降。为归纳出谱形差异规律并解释算法失效机理,本文对典型基底进行了光谱采集,并分析其反射特性。

结合PCBA常见阻焊层、丝印层及金属焊盘等表面外观差异,本文选取并实测了5类典型基底样本,包括FR-4绿油阻焊层、白色丝印区域、黑色油墨阻焊以及银色金属焊盘等典型基底的反射光谱,为保证不同基底具有可比性,所有样本在同一测量系统下获取反射光谱曲线,并只进行暗信号扣除,不引入其他光谱预处理操作。考虑到单块电路板通常难以同时覆盖多类典型基底,选取了覆盖典型基底类型的3块电路板进行三防漆统一涂覆,实测样本如图1所示,各样本编号与基底反射类别的对应关系在1.3节分类分析后统一说明。

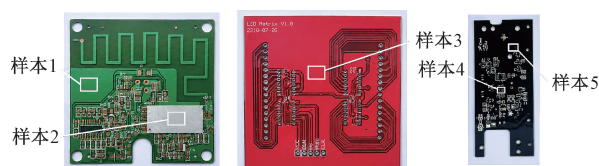
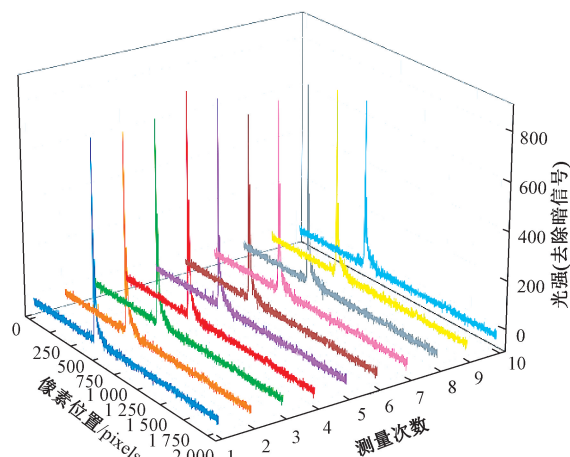


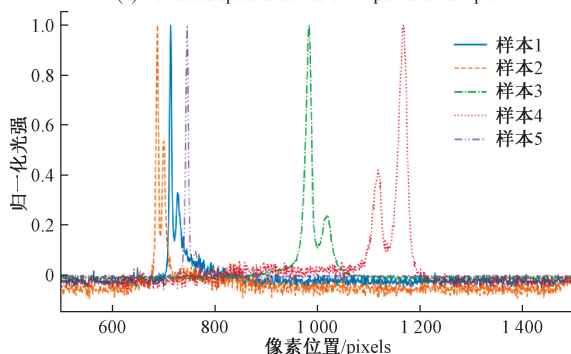
图1 实测样本

Fig. 1 Measured sample

图1中测量区域均采用样本编号,颜色仅用于描述PCBA表面基底的固有外观及其反射特性,并非用于图像颜色识别。各样本表面三防漆厚度控制在80~90 μm 区间,以减少厚度差异对谱形对比的干扰。实验采用光谱共焦传感器为CL3-MG70,控制器型号为CCS Prima,采样率设置为400 Hz,采样点数10个,单点重复测量10次。每个样本内的10个采样点均选取在同一类基底材料区域内,测点周围避开丝印边界、焊盘边缘、过孔、器件引脚及明显涂层堆积区域,以尽量保证同一样本内部基底反射属性的一致性。实测反射光谱曲线如图2所示。



(a) 样本1的10个采样点反射光谱曲线
(a) Reflected spectra curves of 10 points of sample 1



(b) 不同样本第10次采样时的反射光谱曲线
(b) Spectra of different samples at the 10th sampling

图2 实测反射光谱曲线

Fig. 2 Measured reflectance spectrum curves

图 2(a) 为样本 1 连续采集的 10 个采样点反射光谱曲线。10 条谱线的整体形态相似,主峰位置基本重合,第 1 和第 2 界面峰均清晰可见,峰宽、峰高在重复采样时变化不大,无峰区存在小幅起伏,表现为随机噪声与残余基线波动的叠加。

图 2(b) 为不同样本在第 10 次采样时的反射光谱曲线,并对光强进行了归一化处理,以便在统一尺度下比较不同基底条件下的谱形差异与峰特征变化,主要用于比较峰形与相对峰高,不用于绝对光强的定量对比。由图 2(b) 可以观察到,不同样本的主峰位置分布在不同像素区间,其中样本 1~4 存在清晰的双峰结构,分别对应空气-涂层与涂层-基底界面,但基底反射条件会显著影响第 2 界面反射能量分配与峰形呈现。归一化后各曲线主峰被统一到相同峰值(1.0),但次峰的相对高度差异仍非常显著:样本 4 属于高反射类基底,第 1 界面峰强度比第 2 界面峰低。区别于其他类型基底,样本 5 属于强吸收类基底,涂层-基底界面反射显著衰减,第 2 界面峰强度相对更弱,更易被噪声淹没,甚至呈现近似单峰特征。此外,谱线底部仍存在不同程度的噪声带与残余基线漂移,表明即便做了暗信号扣除与归一化处理,不同基底条件下的噪声水平与背景稳定性仍存在差异。这种差异不仅影响峰值显著性,还会削弱固定阈值或固定判据寻峰方法在多基底场景下的一致性与鲁棒性,并可能进一步引起峰位定位的不稳定性,从而影响后续厚度解算精度。

1.3 基底反射类型分类与典型谱形特征

为统一描述不同电路板基底对光谱共焦反射回波的调制作用,基于 1.2 节的实测反射光谱,对基底反射特性进行归纳,并从谱形可观测性角度总结典型特征与潜在的算法失效风险。结合电路板常见表面外观及其对反射回波谱形的影响,可将基底反射特性概括为以下 4 类,分别对应不同的双峰可观测性与谱形特征。

1) 选择性漫反射型:以 FR-4 绿油阻焊、红色阻焊等有色阻焊层为代表。该类基底对特定波段反射较强,对其他波段吸收或反射较弱,光谱回波通常表现为能量在相应波段相对集中。该类型通常可形成较为正常的双峰结构,其中第 2 界面回波可检出但相对第 1 界面回波略弱,峰形整体较为规则,峰位定位相对稳定。

2) 全波段高反漫反型:以白色丝印区域为代表。该类基底对可见光各波段普遍具有较高反射率,且漫反射成分较强。该类基底通常使第 1 和第 2 界面峰幅值接近,但由于能量分散与散射增强,峰形往往更宽,若采用过强平滑或过小搜索窗口,容易引入峰位偏移或峰宽估计不稳定等问题。

3) 强吸收低反射型:以黑色油墨阻焊层为代表。对可见光强吸收、整体反射率低,涂层-基底界面的回波能量明显衰减。其典型表现为第 2 界面峰幅值显著降低,

可能逼近噪声底甚至不可观测,导致传统寻峰算法失效,第 2 界面峰漏检或伪峰误检。

4) 镜面高反射型:以银色金属焊盘为代表。该类基底反射率极高且镜面反射占比大,反射回波能量集中,第 2 界面峰往往幅值极高且尖锐。与此同时,该类基底更容易触发光谱仪动态范围上限,产生峰顶平台化/截顶饱和,从而引入峰值定位偏差。

基于上述分类,结合图 1 所示实测样本的基底材质、表面外观及谱形特征,样本 1~5 与典型基底反射类别对应关系整理如表 1 所示。表 1 以样本编号作为识别依据,颜色仅用于说明 PCBA 表面基底的固有外观及其反射属性。

表 1 样本编号与基底反射类型对应关系
Table 1 Correspondence between sample numbers and substrate reflection types

样本编号	典型基底区域	反射类别	典型谱形特征
样本 1	绿色阻焊油墨	选择性漫反射型	双峰结构较清晰,第 2 界面峰可检出,但受颜色选择性吸收影响,次峰相对较弱
样本 2	白色丝印	全波段高反漫反型	反射率较高,漫反射成分较强,峰形可能展宽
样本 3	红色阻焊油墨	选择性漫反射型	双峰结构较清晰,第 2 界面峰可检出,但受颜色选择性吸收影响,次峰相对较弱
样本 4	银色金属焊盘	镜面高反射型	第 2 界面回波较强,峰形较尖锐,局部可能出现平台化或截顶风险
样本 5	黑色阻焊油墨	强吸收低反射型	第 2 界面峰明显衰减,弱峰易受噪声影响,可能呈现近似单峰特征

综上,不同基底反射特性通过改变双界面回波的能量分配、谱形畸变及信噪比水平,导致跨基底条件下的定位稳定性与一致性问题。因此,有必要进一步从峰位偏移的角度分析谱形畸变的作用机理,并据此构建鲁棒的峰值定位方法。

2 多基底反射的谱线预处理与双界面峰值定位方法

2.1 多基底反射条件下的峰位偏移分析

多基底条件下的反射光谱不仅包含理想界面响应,还叠加了基底引起的背景漂移与随机噪声,其观测模型可表示为:

$$I(p) = I_0(p) + b(p) + \varepsilon(p)$$
 (6)

其中, p 为光谱峰值像素位置; $I_0(p)$ 为理想峰值信

号; $b(p)$ 为基底反射及系统响应引入的低频基线漂移; $\varepsilon(p)$ 为随机噪声。

将反射光谱的峰位定义为局部极大值点,峰顶附近光谱曲线连续可导的条件下,理想峰位 p_0 满足一阶必要条件 $I'(p_0) = 0$; 当同时满足 $I''(p_0) < 0$ 时,对应局部极大值。虽然光谱仪输出为离散像素采样序列,但在峰顶邻域内可将其视为连续谱线的离散采样,因此可采用连续函数形式分析峰位偏移机理。

对实际信号的导数在 $p_0 + \Delta p$ 处进行一阶泰勒展开,并结合极值条件 $I'(p_0 + \Delta p) = 0$, 可得峰值像素位置偏移量近似为:

$$\Delta p \approx - \frac{b'(p_0) + \varepsilon'(p_0)}{I''(p_0)} \quad (7)$$

由式(7)可见,峰位偏移主要受基线斜率 $b'(p_0)$ 与噪声梯度 $\varepsilon'(p_0)$ 共同影响,而 $I''(p_0)$ 决定系统对抗扰动的敏感程度。当基线存在明显漂移或噪声波动较强时,均可能引起峰值像素位置的系统性偏移或随机抖动;而峰

形越尖锐,峰顶曲率越大,对抗扰动的抑制能力越强,峰位定位稳定性也越高。

因此,峰位偏移是基线漂移、噪声扰动及峰形变化共同作用的结果,后续将围绕峰位偏移的主要影响因素,提出相应的光谱处理与双界面峰值定位方法。

2.2 双界面峰值定位方法框架

为应对多基底条件下基线漂移、噪声水平变化及弱次峰定位不稳定等问题,本文构建了面向透明涂层双界面测厚的跨基底稳健定位方法框架,如图3所示。以光谱仪输出的反射光谱为输入,首先通过暗信号扣除基线校正削弱背景漂移对峰值位置的系统性影响;随后采用轻量滤波抑制高频随机扰动,提高弱峰条件下的局部信噪比;在此基础上,通过双峰检测与分割建立界面对应的局部约束窗口,减弱主峰尾部与邻近谱线对次峰定位的干扰;最后在统一窗口约束下采用高斯拟合实现亚像素峰位估计,以提高双界面峰值定位的稳定性与一致性,从而为后续厚度解算提供稳定的峰位。

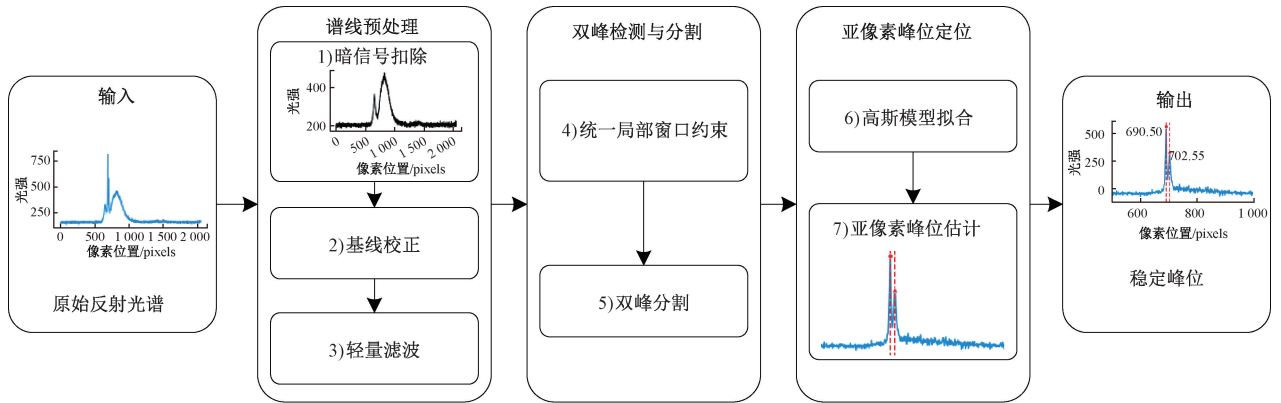


图3 双界面峰值定位方法框架

Fig. 3 Framework of the proposed method

2.3 双界面谱线预处理

1) 暗信号扣除与基线校正

暗信号扣除用于消除光谱仪与测量链路的暗电流、零点偏置等加性系统项,是保证后续处理与跨样本对比的基本前提。设原始光谱为 $I_o(p)$, 暗信号为 $I_d(p)$, 其中 p 为像素位置,则暗信号扣除后的光谱可表示为:

$$I_c(p) = I_o(p) - I_d(p) \quad (8)$$

经过暗信号扣除与归一化,反射光谱底部仍可能存在低频背景起伏与残余基线漂移,会降低弱峰的可检出性,为抑制上述低频背景并避免被尖峰影响,本文采用滑动分位数与平滑相结合的方式估计基线。

在以 p 为中心,半窗口长度为 w 的局部邻域内,取暗信号扣除后光谱的低分位统计量作为该位置的局部背景估计,即:

$$\begin{cases} B_q(p) = Q_q(\{I_c(k) \mid k \in \Omega_p\}) \\ \Omega_p = \{k \mid p - w \leq k \leq p + w\} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Q_q(\cdot)$ 表示 q 分位数算子, $q \in (0, 1)$ 。

由于分位数序列 $B_q(p)$ 仍可能存在局部波动,进一步对其进行平滑处理,得到连续基线估计:

$$B(p) = \sum_{j=-r}^r h(j) B_q(p + j) \quad (10)$$

式中: $h(j)$ 为长度为 $2r + 1$ 的平滑核,满足 $\sum_{j=-r}^r h(j) = 1$ 。

最终,经基线校正后的光谱表示为:

$$I_b(p) = I_c(p) - B(p) \quad (11)$$

相较于简单多项式拟合或滑动均值方法,滑动分位数基线估计更关注局部背景下包络,对强峰、尖刺噪声及局部饱和平台的敏感性较低,因而更适用于多基底条件下具有显著谱形差异的反射光谱基线校正。

由图2(b)可以看出,样本2和样本4在采集过程中,导致的基线漂移较为严重,归一化光强出现大量负值,经上述方法校正后,残余负偏置与低频起伏得到抑制,使相对较弱的第2界面反射回波峰在局部对比度上更为突出,底部噪声带收敛并更接近零基线,负值区间明显减少有助于提高跨基底条件下指标对比的可比性与稳定性,基线校正结果如图4所示。

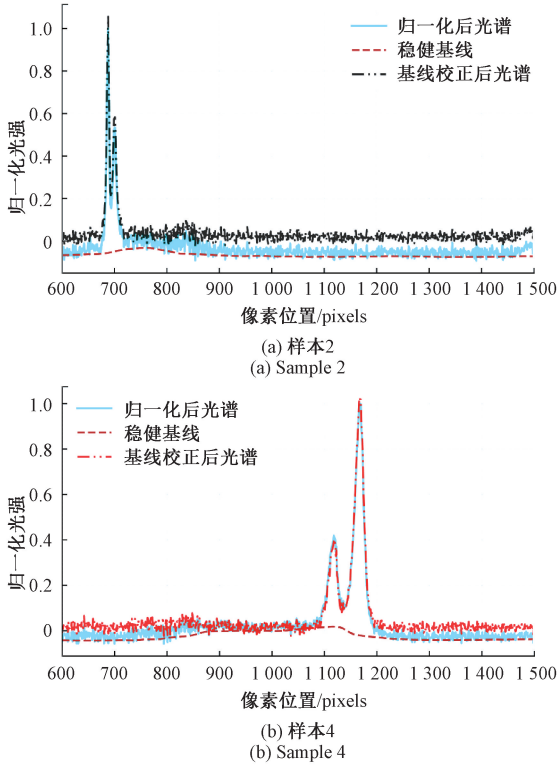


图4 基线校正结果

Fig. 4 Baseline correction results

2) 轻量去噪滤波

不同基底的反射光谱信号中除了双界面聚焦反射的双峰信号,同时夹杂着各种噪声,因此,必须消除随机噪声,在抑制高频噪声的同时尽量保持峰位不偏移,幅值不降低,保持峰宽与峰顶形态,避免过度平滑导致峰顶钝化,才能实现峰值的准确提取。

为比较不同滤波方法在多基底条件下的适用性,本文选取第2界面反射回波接近噪声底部的强吸收低反射型(样本5),以及峰形尖锐可能出现截顶/平台的镜面高反射型(样本4)作为代表样本,分别采用均值滤波、中值滤波、高斯滤波与SG滤波4种典型的滤波方法进行去噪对比,分别代表线性平滑、非线性抗脉冲噪声、近似低通的连续平滑以及局部多项式拟合的形状保持型平滑,能够覆盖光谱共焦回波处理中最常见的噪声形态与峰形失真机制。滤波窗口长度统一设置

为 $\{3, 5, 7, 9, 11, 13\}$,在完成暗信号扣除与稳健基线校正后,进行滤波与指标评估。

评价指标采用次峰幅值保持率(R_{p_2})、次峰信噪比(signal-to-noise ratio, SNR_2)、次峰半高宽(full width at half maximum, FWHM₂)。

设第2界面峰的峰位为 p_2 ,峰值幅度为 $I(p_2)$, $p_2^{(0)}$ 为未滤波曲线中检出的第2界面峰峰位,峰值幅度为 $A_{2,0} = I_0(p_2^{(0)})$,滤波后对应的峰值幅度为 $A_{2,f} = I_f(p_2^{(f)})$ 。次峰幅值保持率表示为第2界面峰滤波后的幅值与未滤波前幅值的比。

$$R_{p_2} = \frac{A_{2,f}}{A_{2,0}} = \frac{I_f(p_2^{(f)})}{I_0(p_2^{(0)})} \times 100\% \quad (12)$$

次峰信噪比定义为次峰幅度与背景噪声标准差之比,背景噪声标准差 σ 采用中位数绝对偏差(median absolute deviation, MAD)噪声估计,去除主峰/次峰的邻域,根据背景中位值计算得到 σ 。

设去除主、次峰邻域后的背景区域像素集合为 Ω_{bg} ,对应的强度值为 $\{I_{bg}(p) | p \in \Omega_{bg}\}$ 。则背景中位值为:

$$m_{bg} = \text{median}\{I_{bg}(p) | p \in \Omega_{bg}\} \quad (13)$$

式中:median($\cdot$)表示中位数算子。

背景噪声的MAD估计定义为:

$$MAD_{bg} = \text{median}\{|I_{bg}(p) - m_{bg}| | p \in \Omega_{bg}\} \quad (14)$$

进一步,背景噪声标准差 σ 为:

$$\sigma = 1.4826 \cdot MAD_{bg} \quad (15)$$

式中:常数1.4826为将MAD转换为正态分布标准差的无偏比例因子。

将式(13)、(14)代入(15)可得:

$$\sigma = 1.4826 \cdot \text{median}\{|I_{bg}(p) - \text{median}(I_{bg})| | p \in \Omega_{bg}\} \quad (16)$$

次峰信噪比可以表示为:

$$SNR_2 = \frac{A_{2,f}}{\sigma} \quad (17)$$

次峰半高宽FWHM₂指在光谱曲线的峰值高度下降到其最大值的一半时,曲线上两个对应点之间的水平距离。半高值为 $I_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}A_{2,f}$,在第2界面峰的左右两侧分别求与 $I_{\frac{1}{2}}$ 的交点位置 p_m, p_n ,FWHM₂表示为:

$$FWHM_2 = |p_m - p_n| \quad (18)$$

图5(a)和(b)分别为不同窗口大小下4种滤波方法的结果图。从图5(a)中可以看出,随着窗口增大,底部噪声明显更平,但均值和中值滤波的峰顶变圆、变宽,窗口增大至9以后,第2界面峰未检出,从图5(b)可以看出,SG与高斯滤波的可用窗口范围更宽,曲线更连续,特别是SG滤波在各窗口下峰形保持最好,峰尖锐度保持、形态更接近原始波形。

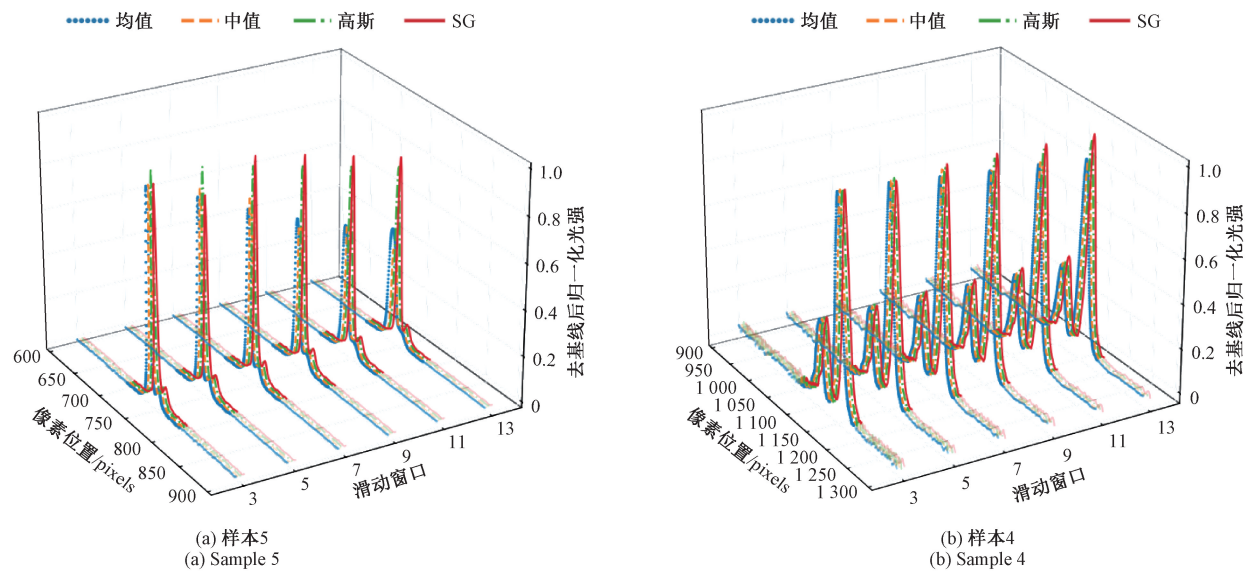


图5 不同窗口下4种滤波方法对比

Fig.5 Comparison of four filtering methods under different window sizes

图6给出了4种滤波方法在不同窗口下的指标对比结果,由图6(a)和(d)可见,随着窗口增大,次峰幅值保持率整体呈下降趋势,说明过强的平滑会削弱较弱次峰的峰高,进而增加次峰漏检风险。该现象在样本5(强吸收低反射型)中尤为明显:当窗口增大时,均值滤波与中

值滤波更容易将次峰抹平,导致次峰无法稳定检出。综合图6(b)和(e)中的变化与图6(c)和(f)中的对比可知,窗口大小为7~11的SG滤波在峰形保持与信噪比提升之间取得了更优的表现;高斯滤波次之,而均值/中值滤波在强吸收低反射场景下的鲁棒性相对不足。

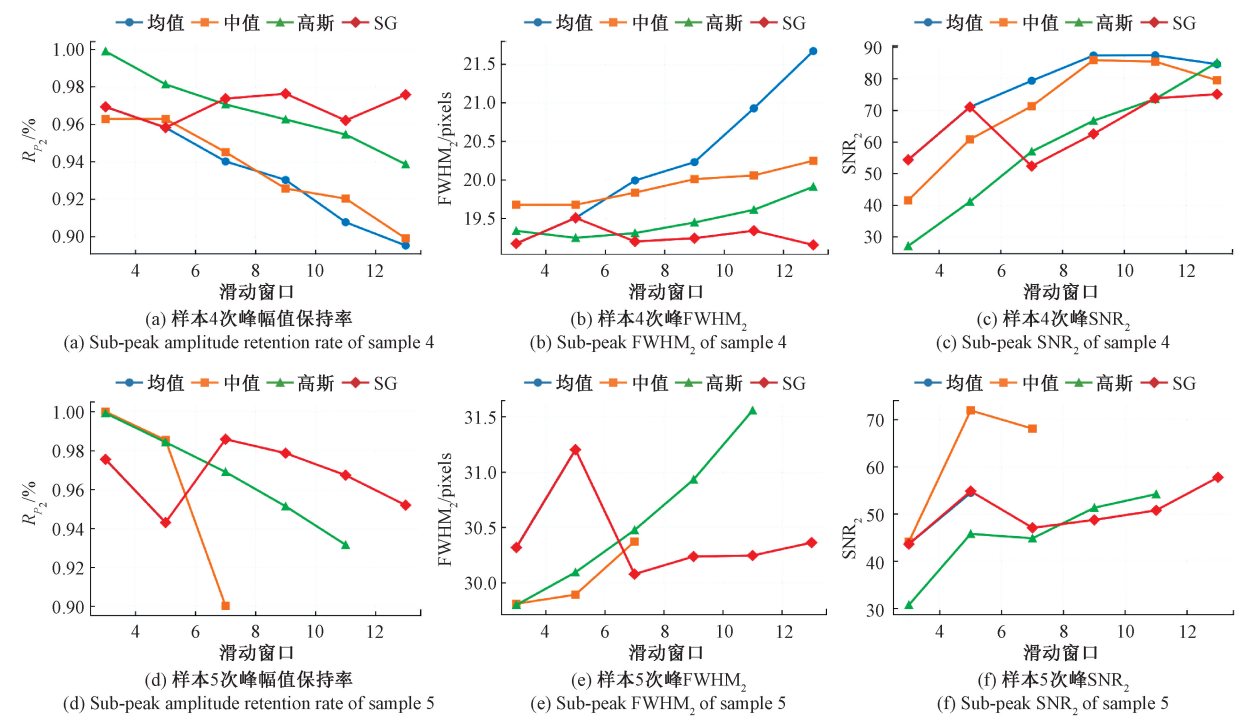


图6 指标对比结果

Fig.6 Indicator comparison results

2.4 双峰峰值定位方法

由于涂层厚度最终由第 1 界面峰和第 2 界面峰的位置差计算得到,因此双界面峰提取的目标是在重复测量条件下获得稳定、可重复的峰位,尤其是对幅值较弱、易受噪声与尾迹影响的第 2 界面峰。为此,在统一的预处理与一致的局部窗口约束下,对 4 种典型峰值定位方法进行对比:极值法、质心法、加权质心法^[21]、高斯拟合法^[22],并据此确定适用于三防漆透明涂层测量的峰值定位方法。

1) 双峰初始检测与局部窗口构建

设经基线校正和 SG 滤波后的光谱信号为 $I_s(p)$, 首先在感兴趣区域(ROI)内基于峰显著性与最小峰距约束获得双峰的初始位置 $p_1^{(0)}$ 和 $p_2^{(0)}$ 。两峰之间的谷底位置为 p_v , 则将双峰划分为两个互不重叠的局部窗口:

$$\begin{cases} \Omega_1 = [p_l, p_v] \\ \Omega_2 = [p_v, p_r] \end{cases} \quad (19)$$

其中, Ω_1 和 Ω_2 分别对应第 1 界面峰和第 2 界面峰的局部定位窗口, p_l 和 p_r 为由初始峰位及其局部峰宽确定的左右边界。

采用统一的局部窗口构建规则,可避免不同方法因窗口差异引入额外误差,从而保证对比的公平性。

2) 4 种峰值定位方法的数学表达

在局部窗口 $\Omega_k(k = 1, 2)$ 内,4 种方法的共同输入为光谱信号 $I_s(p)$, 输出为对应的界面峰位估计 $\hat{p}_k$ 。

(1) 极值法

极值法直接取局部窗口内最大光强对应的像素位置作为峰位估计,即:

$$\hat{p}_k = \operatorname{argmax}_{p \in \Omega_k} I_s(p) \quad (20)$$

该方法实现简单,对强峰稳定,但峰位分辨率受限于采样栅格,且对弱峰在噪声下易发生误检。

(2) 质心法

质心法利用局部窗口内光谱强度分布计算峰位重心,其表达式为:

$$\hat{p}_k = \frac{\sum_{p \in \Omega_k} p I_s(p)}{\sum_{p \in \Omega_k} I_s(p)} \quad (21)$$

当峰形存在拖尾或窗口中包含较强背景分量时,质心法易产生偏移。

(3) 加权质心法

为增强峰顶区域对峰位估计的主导作用,采用加权质心形式:

$$\hat{p}_k = \frac{\sum_{p \in \Omega_k} p [I_s(p)]^\alpha}{\sum_{p \in \Omega_k} [I_s(p)]^\alpha} \quad (22)$$

其中, $\alpha > 1$ 为权重指数,用于提高高幅值样本点的权重。相较于普通质心法,该方法能够在一定程度上减弱峰尾和背景对定位结果的影响。

(4) 高斯拟合法

考虑到局部峰形在峰顶邻域内可近似表示为单峰高斯分布,本文采用式(23)所示的局部高斯模型对每个界面峰进行拟合:

$$g(p; \theta) = A \exp \left[-\frac{(p - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] + C \quad (23)$$

其中, A 为峰值幅度; μ 为峰中心位置; σ 为标准差(反映峰宽); C 为基线偏移。

参数向量记为:

$$\theta = \{A, \mu, \sigma, C\} \quad (24)$$

采用非线性最小二乘法估计模型参数,即求解:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin}_{\theta} \sum_{p \in \Omega_k} [I_s(p) - g(p; \theta)]^2 \quad (25)$$

则拟合得到的峰中心参数 $\hat{\mu}$ 作为该界面峰位的亚像素估计值:

$$\hat{p}_k = \hat{\mu} \quad (26)$$

相较于直接取极值或基于离散采样点求质心,高斯拟合法通过参数模型约束局部峰形,可在噪声背景下实现亚像素级定位,并减弱局部随机起伏对峰位估计的影响。

3) 方法对比与最优方法选择

为量化不同算法的定位稳定性,本文在统一预处理、统一双峰分割规则和统一局部窗口约束下,对样本 5 的同一测点重复测量 10 次,分别采用 4 种方法估计第 1 界面峰位 $\hat{p}_1$ 和第 2 界面峰位 $\hat{p}_2$ 及峰间距 $\Delta \hat{p}$,并统计均值 μ 与标准差 σ ,得到的统计结果如表 2 所示。

表 2 峰值定位方法对比结果

Table 2 Comparison of peak localization methods

方法	$\mu(\hat{p}_1)$	$\sigma(\hat{p}_1)$	$\mu(\hat{p}_2)$	$\sigma(\hat{p}_2)$	$\mu(\Delta \hat{p})$	$\sigma(\Delta \hat{p})$
极值法	727.000	0	741.800	0.422	14.800	0.422
质心法	726.528	0.037 8	741.304	0.209	14.776	0.210
加权质心法	726.551	0.014 8	741.354	0.177	14.803	0.180
高斯拟合法	726.540	0.012 7	741.253	0.110	14.712	0.118

根据表 2 的统计结果,极值法的 $\sigma(\hat{p}_1) = 0$, 这并不代表其亚像素精度更高,而是输出受采样栅格限制;其第 2 界面峰标准差和峰间距标准差并未达到最优。相比之下,高斯拟合法在第 2 界面弱峰的峰位标准差与峰间距标准差上均更小,分别为 0.110 和 0.118,说明其在噪声背景与峰形不完全对称的情况下,能更有效抑制局部随机起伏引起的峰位漂移,从而提高双界面峰位定位的重复性。因此,本文后续测量实验采用高斯拟合法作为峰值定位方法。

3 测量实验验证与结果讨论

3.1 测量系统

本文采用的测量系统如图 7 所示。



图 7 测量系统
Fig. 7 Measurement system

利用光谱共焦传感器 CL3-MG70 进行三防漆厚度相关的反射光谱采集,配套控制器为 CCS PRIMA,传感器主要参数见表 3。

表 3 CL3-MG70 传感器参数

Table 3 CL3-MG70 sensor parameters

参数	值
测量范围/ μm	1 400
工作距离/mm	12.2
数值孔径	0.41
轴向分辨率/nm	10
光斑尺寸/ μm	11.9
最小可测厚度/ μm	40

测量平台为三轴精密运动控制系统,由 X/Y/Z 三轴直线模组实现传感器与被测 PCB 样品之间的相对运动与定点扫描。所用样本与采集参数与 1.2 节一致。

根据图 3 所示的方法,在进行暗信号扣除与基线校正后,采用 SG 滤波对光谱数据进行平滑处理,消除各种随机噪声的影响,随后利用高斯拟合实现双界面反射峰的峰值定位,根据 CL3-MG70 标定的距离-像素查找表将像素位置转换为轴向距离,最后结合式(5)进行折射率修正,获得三防漆的几何厚度。

本文所测对象为透明聚合物类三防漆涂层,所用材料厂家给出的折射率标称值为 $n = 1.50 @ 589 \text{ nm}$ 。同时透明聚合物类涂层在可见光波段固化后的典型折射率范围为 1.48~1.52,本文主要关注多基底反射条件下的峰值定位稳定性和重复测量性能,采用 $n = 1.5$ 作为涂层在传感器工作波段内的等效折射率,用于一阶厚度修正。

三防漆折射率会受到材料配方、固化状态、工作波长及温度等因素影响,进一步分析折射率不确定度对厚度结果的影响。折射率波动与厚度相对误差近似满足 $\Delta t/t \approx \Delta n/n$,而 $\Delta n = \pm 0.02$,对应的厚度相对不确定度约为 $\pm 1.33\%$,对本文 80~90 μm 量级涂层,折射率不确定度引入的厚度绝对误差约 $\pm 1.1 \mu\text{m}$ 。该误差与重复性波动处于同一微米量级,并小于对比实验中的最大绝对差值,折射率取值主要影响厚度绝对值的比例换算,因此在本文实验条件下,采用固定折射率 $n = 1.5$ 进行修正是合理可行的。

3.2 测量重复性评价

为了评估测量方法在不同基底反射条件下的重复性与稳定性,在同一测量条件下对 5 个样本分别选取 5 个测点进行重复测量,每个测点连续测量 10 次,对每个测点的 10 次测量值,分别计算其均值、极差和相对标准差(relative standard deviation, RSD)作为重复性评价指标。其中,均值用于表征该点厚度的中心估计,极差用于反映重复测量的最大波动幅度,相对标准差用于量化随机误差水平。统计结果如表 4 所示。

对表 4 数据进行分析,所有测点的 RSD 均分布在 0.34%~1.18%。其中,样本 3 和 4 的重复性较好,所有测点 RSD 均低于 0.6%,RSD 均值分别为 0.46% 和 0.36%,说明在该类基底条件下双界面峰结构较清晰,峰值定位稳定性较高。样本 1 和 2 的 RSD 均值分别为 0.89% 和 0.83%,部分测点 RSD 高于 0.8%,表明选择性漫反射或全波段高反漫反基底,局部散射差异、峰形展宽及涂层微小不均匀性会引入更明显的重复测量波动。样本 5 属于强吸收低反射基底,第 2 界面峰信噪比较低,RSD 均值为 0.93%,其中测点 3 的 RSD 达到最大值 1.18%,但仍未出现明显的双峰漏检。所有测点重复测量极差为 0.82~3.59 μm ,表明所提方法在多基底反射条

表 4 不同样本的重复测量结果
Table 4 Repeated measurement results

样本	测点	均值/ μm	极差/ μm	RSD/%
样本 1	点 1	82.00	2.54	1.00
	点 2	87.45	2.13	0.79
	点 3	87.37	1.80	0.78
	点 4	84.77	2.06	0.95
	点 5	81.72	2.20	0.95
样本 2	点 1	86.31	1.28	1.05
	点 2	80.47	0.84	0.41
	点 3	84.46	1.89	1.00
	点 4	86.44	1.27	0.81
	点 5	83.43	1.31	0.86
样本 3	点 1	89.57	1.34	0.41
	点 2	89.00	1.20	0.43
	点 3	84.38	1.43	0.54
	点 4	88.19	1.73	0.55
	点 5	86.71	1.18	0.38
样本 4	点 1	85.45	1.20	0.38
	点 2	89.12	1.03	0.34
	点 3	89.00	1.05	0.41
	点 4	88.98	0.86	0.35
	点 5	89.10	0.82	0.34
样本 5	点 1	85.56	3.26	1.11
	点 2	81.57	1.95	0.86
	点 3	84.24	3.59	1.18
	点 4	84.55	2.08	0.71
	点 5	83.20	1.94	0.79



图 8 涂层测厚仪测量过程
Fig. 8 Coating thickness gauge measurement process

表 5 两种方法测量对比结果
Table 5 Comparison of results obtained using two different measurement methods

样本	测点	光谱共焦 测量值/ μm	测厚仪 测量值/ μm	绝对 误差/ μm	相对 误差/ %
样本 1	点 1	82.00	81.5	0.50	0.61
	点 2	87.45	85.7	1.75	2.04
	点 3	87.37	86.4	0.97	1.12
	点 4	84.77	83.8	0.97	1.16
	点 5	81.72	81.7	0.02	0.02
样本 2	点 1	86.31	86.5	-0.19	-0.22
	点 2	80.47	79.6	0.87	1.09
	点 3	84.46	86.5	-2.04	-2.36
	点 4	86.44	85.5	0.94	1.10
	点 5	83.43	81.7	1.73	2.12
样本 3	点 1	89.57	88.7	0.87	0.98
	点 2	89.00	87.5	1.50	1.71
	点 3	84.38	86.5	-2.12	-2.45
	点 4	88.19	86.4	1.79	2.07
	点 5	86.71	86.5	0.21	0.24
样本 4	点 1	85.45	84.5	0.95	1.12
	点 2	89.12	87.6	1.52	1.74
	点 3	89.00	86.8	2.20	2.53
	点 4	88.98	85.4	3.58	4.19
	点 5	89.10	87.3	1.8	2.06
样本 5	点 1	85.56	85.7	-0.14	-0.16
	点 2	81.57	84.7	-3.13	-3.70
	点 3	84.24	86.6	-2.36	-2.73
	点 4	84.55	86.5	-1.95	-2.25
	点 5	83.20	85.8	-2.60	-3.03

件下能够保持微米级重复性,但弱反射和强散射基底仍是影响稳定性的主要因素。

3.3 对比测量实验

为验证本文提出的测厚方法的准确性,选用林上LS225 涂层测厚仪对样本 1~5 进行比较测量,每个点重复测量 10 次求平均值作为测量结果,测量过程如图 8 所示,测量数据对比见表 5。采用的 N1500 涡流感应探头适用于非铁磁性金属基体上的非导电涂镀层厚度测量,测量范围为 0~1 500 μm ,测量精度为 $\pm(2\% H+0.3 \mu\text{m})$ 。

从对比结果可见,本文提出的光谱共焦测量方法与测厚仪测量值整体一致,所有测点的绝对误差均小于 5 μm ,相对误差均小于 5%,表明该方法在本实验条件下具有良好的准确性。虽然两种方法数值结果接近,但光

谱共焦法在三防漆等透明涂层厚度检测场景中仍具有更突出的工程适用性,具备非接触、无损伤的优势,其微米级光斑支持微小区域厚度测量。实验验证了本文算法通过谱线预处理与双峰定位方法削弱了基底反射差异对测量的影响,使得其在复杂基底条件下仍能保持较高的稳定性与可靠性。

4 结 论

针对PCBA复杂基底反射特性对透明涂层厚度测量带来的技术挑战,本文研究了基底材质与表面外观对反射光谱的影响规律,分析了多基底反射条件下的峰位偏移机理,并提出面向峰位偏移抑制的透明涂层双界面稳健定位方法。通过暗信号扣除与滑动分位数基线校正抑制背景漂移,采用SG滤波降低随机噪声,并保持峰形与峰位,结合双峰检测与分割约束下的局部高斯拟合实现双界面峰位的稳健定位,最终通过距离-像素映射与折射率修正得到几何厚度。实验结果表明,在5类典型基底样本的重复性测试中,各测点厚度结果的RSD介于0.34%~1.18%。其中,样本3和4所有测点RSD均低于0.6%,RSD均值分别为0.46%和0.36%;样本1、2和5的RSD均值分别为0.89%、0.83%和0.93%,所有测点重复测量极差为0.82~3.59 μm ,整体保持 μm 级稳定性。对比实验表明,本方法与LS225涂层测厚仪结果高度一致,所有测点的绝对误差均小于5 μm ,相对误差均小于5%,验证了该方法的准确性与工程可用性,为复杂基底条件下透明涂层厚度的快速、非接触测量提供了更高效、更精确的解决方案。未来的研究将探索深度学习策略,根据实时捕获的基底光谱特征自动调整算法参数,并探讨倾斜角度对光谱共焦信号强度与峰位偏移的影响,建立相应补偿模型,以扩展方法的适用范围。

参考文献

- [1] 张希涛,张鲜明,谢强,等. 片式电阻器硫化失效原因分析及解决对策[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2025,43(5): 42-46.
ZHANG X T, ZHANG X M, XIE Q, et al. Cause analysis and countermeasures of sulfurization failure of chip resistors [J]. Electronic Product Reliability and Environment Testing, 2025,43(5): 42-46.
- [2] VIEIRA D N, DELGADO-LIMA A, SANTOS D N, et al. The effect of acrylic conformal coating in the reliability of solder joints [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022,12(4): 676-681.
- [3] GONG ZH T, SUN D X, LIU Y N. Effects of a conformal coating on the signal integrity of space elec-

- tronics systems[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022, 12(11): 1882-1889.
- [4] 刘易奕,李秋峰,李昕,等. 多防护涂层超声检测混叠信号稀疏分解与分离重构处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2025,39(10): 111-121.
LIU Y Y, LI Q F, LI X, et al. Sparse decomposition and separation reconstruction processing for aliased signals in ultrasonic testing of multiple protective coating [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(10): 111-121.
- [5] 谢金鹏,滕玉林,李辉,等. 基于电磁感应的涂镀层厚度同步测量方法[J]. 电子测量技术, 2025,48(22): 141-151.
XIE J P, TENG Y L, LI H, et al. Synchronous measurement method of coating thickness based on electromagnetic induction [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(22): 141-151.
- [6] 刘磊,卢思佳,周帅,等. 电子元器件镍金复合镀层厚度测试方法研究[J]. 中国测试, 2017,43(3): 9-14.
LIU L, LU S J, ZHOU SH, et al. Research on test method of nickel gold composite coating thickness of electronic component [J]. China Measurement & Test, 2017,43(3): 9-14.
- [7] YU Q, ZHANG Y L, SHANG W J, et al. Thickness measurement for glass slides based on chromatic confocal microscopy with inclined illumination [J]. Photonics, 2021, 8(5): 170.
- [8] 张雅丽,余卿,程方,等. 光纤束并行彩色共聚焦测量系统及实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 23-31.
ZHANG Y L, YU Q, CHENG F, et al. Parallel chromatic confocal measurement system based on optical fiber bundle and its experimental study [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 23-31.
- [9] 黄贺,张斌智,张瀛怀,等. Y型光纤衍衍混合光谱共焦测距系统设计[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(6): 206-215.
HUANG H, ZHANG B ZH, ZHANG Y H, et al. Design of Y-shaped fiber optic hybrid diffractive confocal ranging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(6): 206-215.
- [10] LIU CH M, LU G Y, LIU CH Y, et al. Compact chromatic confocal sensor for displacement and thickness measurements [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(5): 055104.
- [11] 李春艳,李丹琳,刘继红,等. 光谱共焦法厚度测量系统中抖动补偿算法研究[J]. 红外与激光工程,

- 2024, 53(1): 170-180.
- LI CH Y, LI D L, LIU J H, et al. Research on jitter compensation algorithm in spectral confocal thickness measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(1): 170-180.
- [12] 高峰, 郑源, 范嘉博, 等. 基于光谱共焦原理的滚珠螺母多尺度测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(10): 22-31.
- GAO F, ZHENG Y, FAN J B, et al. Multi-scale measurement method of ballscrew nut based on spectral confocal principle [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(10): 22-31.
- [13] 陈彦宇, 田东庄, 居培. 基于光谱共焦原理的钻杆接头内螺纹参数测量[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(6): 862-873.
- CHEN Y Y, TIAN D ZH, JU P. A measurement method for the internal thread parameters of drill pipe joints based on spectral confocal principle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(6): 862-873.
- [14] 卢荣胜, 张紫龙, 张艾琳, 等. 光谱共焦传感器关键技术研究进展(特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(2): 77-104.
- LU R SH, ZHANG Z L, ZHANG AI L, et al. Research progress on key technologies of chromatic confocal sensors (Invited) [J]. *Laser & Optoelectronics Pro-gress*, 2024, 61(2): 77-104.
- [15] 王玉龙, 李杰, 侯溪, 等. 基于衍射色散原理的光谱共焦位移测量技术综述[J]. *半导体光电*, 2023, 44(1): 1-7.
- WANG Y L, LI J, HOU X, et al. Review of chromatic confocal displacement measurement techniques based on diffractive dispersion [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2023, 44(1): 1-7.
- [16] LU W L, DAI J CH, ZENG W H, et al. Enhancing precision of chromatic confocal measurement through linear interpolation based centroid algorithm [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2024, 12(3): 035020.
- [17] LI M X, CHEN J B, CHEN M Y. Spectroscopic interferometer: Larger measurement range using wavelet threshold denoising and adaptive peak extraction [J]. *Optics Communications*, 2024, 557: 130344.
- [18] LIU J, XU ZH L, WANG Z Y, et al. Fast Gaussian fitting peak extraction for confocal microscopy [J]. *Journal of Microscopy*, 2025, 300: 117-123.
- [19] ZHAO W H, YUE K, LIANG Y K, et al. Generalized cross-correlation based wavelength extraction for chromatic confocal microscopy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36(1): 015054.
- [20] CHEN CH, LEACH R., WANG J, et al. Two-dimensional spectral signal model for chromatic confocal microscopy [J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7179-7196.
- [21] CHEN CH, WANG J, LIU X J, et al. Influence of sample surface height for evaluation of peak extraction algorithms in confocal microscopy [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6516-6526.
- [22] LUO D, KUANG C F, LIU X. Fiber-based chromatic confocal microscope with Gaussian fitting method [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 788-793.

作者简介



刘夏丽, 2017 年于广东工业大学获得硕士学位, 现为广东工业大学博士研究生, 主要研究方向为光学精密测量, 智能视觉检测。

E-mail: lxl@gdut.edu.cn

Liu Xiali received her M. Sc. degree from Guangdong University of Technology in 2017. She is currently a doctoral candidate at Guangdong University of Technology. Her main research interests include precision optical measurement and intelligent vision inspection.



邓耀华(通信作者), 2012 年于华南理工大学获得博士学位, 现为广东工业大学机电工程学院教授, 主要研究方向为智能感知, 精密检测。

E-mail: dengyaohua@gdut.edu.cn

Deng Yaohua (Corresponding author) received his Ph. D. degree from South China University of Technology in 2012. He is currently a professor at the School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology. His main research interests include intelligent perception and precision measurement, and related fields.