 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i5.10532

Research on the Impact of Temperature Drift in UV Curing Technology on Irradiance Measurement: A Systematic Analysis Based on the VR Eyewear Speaker Assembly Process

Shou Yuan Yadong Mu

Goertek Inc. Weifang, Shandong, 261000, China

Abstract

UV curing technology has been widely adopted in industrial manufacturing due to its high curing efficiency, low energy consumption, and environmental advantages. However, the heat generated during operation by UV curing equipment induces temperature fluctuations, compromising the accuracy of irradiance measurements. This study systematically investigates the mechanism by which temperature affects the performance of UV photodetectors in the UV curing process used during VR eyewear speaker assembly. The findings reveal that elevated temperatures increase the sensor's dark current (approximately doubling for every 8-10° C rise) and reduce its response rate (down 0.1% per 1° C increase), collectively resulting in significant negative deviations in irradiance readings.

Keywords

UV curing; irradiance measurement; temperature compensation; photoelectric sensor; responsivity

UV固化技术温度漂移对辐照度测量的影响研究——基于VR眼镜Speaker组装工序的系统性分析

苑收 穆亚东

歌尔股份有限公司，中国·山东 潍坊 261000

摘要

UV固化技术因其固化效率高,能耗低及环保等优势,在工业制造领域得到广泛应用.然而,UV固化设备在工作过程中产生的热量导致温度变化，进而影响辐照度测量的准确性。本研究针对VR眼镜Speaker组装工序中UV固化设备的温度漂移问题,系统分析了温度对紫外光电传感器性能的影响机理.研究表明:温度升高会引起传感器暗电流增大(温度每升高8~10℃,暗电流约翻倍）和响应度下降（温度每升高1℃，响应度下降约0.1%），两者共同作用导致辐照度读数出现显著负偏差。

关键词

UV固化；辐照度测量；温度补偿；光电传感器；响应度

1 概述

1.1 国内外研究现状

硅光电二极管的暗电流与温度呈指数关系，符合Arrhenius方程描述的热激发载流子生成规律。响应度随温度升高而下降，主要原因是半导体材料带隙宽度随温度变化。

在UV光源热管理方面,传统汞灯UV固化系统的散热设计已相对成熟。随着UV-LED技术的快速发展，由于其具有能耗低,寿命长,开关速度快,环保无汞等优点,正在逐步取代传统汞灯成为UV固化光源的主流选择.然而,U-V-LED的光电转换效率通常仅为20%~40%,其余能量以热量形式释放,加之其紧凑的模块化设计,导致功率密度大幅提升，散热问题更加突出。

1.2 研究背景

紫外光（UV）固化技术是一种利用紫外线照射使光敏材料发生光化学反应从而实现快速固化的先进技术.相较于传统的热固化或自然干燥工艺，UV固化技术具有以下显著优势:固化时间短,设备体积小,产品性能优异(粘结强度高),环保无溶剂挥发,工艺可控性强,易于实现自动化生产。

在现代工业生产中，UV固化技术已被广泛应用于电子制造、光学元件加工、医疗器械、汽车内饰件以及3D打印

【作者简介】苑收（1979–），男，中国山东青岛人，本科，工程师，从事电子信息工程研究。

等领域。特别是在精密电子产品制造领域，如VR眼镜、智能手机、可穿戴设备等产品的组装工序中，UV固化技术发挥着不可替代的作用。

1.3 研究意义与主要内容

本文研究旨在系统性地解决UV固化设备（尤其是UV--LED)工作温度变化对辐照度测量精度影响的工程问题.具体研究意义体现在以下几个方面：

揭示温度对紫外光电传感器性能影响的物理机理,为传感器选型和系统设计提供理论依据；

量化分析温度—测量偏差的定量关系,为补偿算法开发提供数据支撑；

提出兼具可行性和经济性的综合解决方案，支撑UV固化工艺的质量提升。

本文的主要研究内容包括以下四个部分：

第一部分：UV辐照度测量原理与温度影响机理分析，详细阐述UV照度计的工作原理以及温度对传感器性能的影响机制；

第二部分:温度影响的实验观测与数据验证,通过设计系统化实验量化分析温度—测量偏差关系；

第三部分:热管理策略与补偿方法研究,提出并验证三种综合解决方案；

第四部分:结论与展望,总结研究成果并提出未来研究方向。

2 UV辐照度测量原理与温度影响机理分析

2.1 UV照度计的工作原理

UV照度计（又称UV能量计或UV辐照度计）是现代UV固化工艺中不可或缺的监测设备,其核心功能是将紫外线辐射能量转换为可量化的电信号。[1]本研究采用的林上LS129型UV照度计为例,其工作原理基于光电效应,这一过程可以分为三个关键步骤：

（1）光子接收阶段

UV照度计的光电传感器表面覆盖有特殊的光敏材料，其光谱响应范围被优化为315 nm至400 nm的UVA波段，峰值响应波长（λp）为365 nm。。

（2）电信号产生阶段

产生的光电流强度与入射紫外光子的数量成正比,即与接收到的紫外辐照度成正比例关系。典型的UV照度计能够达到0.1 mW/cm 的分辨率，满足工业级精度要求。

（3）信号处理与显示阶段

UV照度计的光谱响应特性是其能否准确测量UV固化效果的关键。UV传感器（以林上LS129为例）与普通光电二极管的光谱响应存在显著差异：UV传感器在365 nm附近有尖锐的峰值响应,而普通光电二极管则在更宽的可见光范围内有响应。[2]这种选择性响应确保了UV照度计专门针对固化所需的UVA波段进行优化，排除其他波长光的干扰。

2.2 温度对传感器性能的影响机理

温度变化对UV照度计的测量精度有着极为显著的影响，这一影响主要源于半导体材料的本征特性.在VR眼镜Speaker组装过程中，UV固化设备长时间工作会产生大量热量,导致传感器环境温度急剧上升,进而影响测量结果的准确性。

2.2.1 暗电流变化及其影响

暗电流（Dark Current）是指光电二极管在完全无光条件下,由于热激发而产生的电流.暗电流的大小与温度呈指数关系，遵循半导体理论的Arrhenius方程：

Idark=I0 · exp(Eg/ (kT))

其中，Idark为暗电流，I0为参考电流，Eg为半导体带隙能量，k为玻尔兹曼常数，T为绝对温度。实验数据表明，温度每升高8~10℃，暗电流值大约翻倍。在UV固化应用中，传感器工作温度可能从室温(20℃)迅速升至93℃以上,暗电流可能增加数十甚至上百倍。

2.2.2 响应度变化及其影响

光电传感器的响应度（R，即单位辐射功率产生的电流大小)同样受温度影响.半导体材料的带隙宽度随温度升高而减小,导致产生电子—空穴对所需的光子能量阈值降低。[3]理论上，温度每升高1℃，硅光电二极管的响应度大约下降0.1%左右。

在UV固化过程中,这种响应度变化会导致在UV灯实际输出功率不变的情况下,传感器测量值随温度升高而降低。实验数据表明，当传感器温度从80℃降至50℃时，UV能量计显示值从60 mW/cm 上升至65 mW/cm ,变化幅度近8%.这种负温度系数特性与暗电流的正温度系数特性相互制约，但在UVA波段，响应度变化通常占主导地位。

温度变化还会影响传感器内信号处理电路的性能.运算放大器的输入偏置电流和输入失调电压均具有温度敏感性，电阻、电容等被动元件的参数也会随温度波动。

3 实验观测与数据验证

3.1 实验方案设计

为量化分析温度对UV辐照度测量的影响，本研究针对VR眼镜组装产线中的实际工况设计了一系列系统化实验。[4]实验装置模拟了实际生产环境,主要包括:UV−LED光源（峰值波长365 nm，功率密度可调）、密闭固化箱体（模拟实际工装的热累积环境）以及林上LS129 UV照度计。实验过程中采用高精度热电偶实时监测传感器安装点的温度变化，并同步记录辐照度读数。

实验采用控制变量法，系统研究了以下工况：

不同环境温度下的基准测量；

连续工作状态下温度随时间的变化规律；

温度—辐照度读数的定量关系；

不同散热条件下的补偿效果验证。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 温度时变特性

展示了UV灯开启后传感器安装点温度随时间的变化曲线。实验数据显示，在无主动散热的情况下，UV灯开启后短短10分钟内,传感器安装点的温度从室温20℃急速上升至93℃，温升速率约为7.3℃/min。这一快速温升过程主要源于UV-LED光源的焦耳热效应以及密闭箱体的热累积效应。

3.2.2 温度—辐照度相关性

实验结果表明，随着温度的持续升高，UV能量读数从初始的85 mW/cm 持续下降至58 mW/cm ，降幅高达31.8%.这一观测结果与第二章的理论分析高度一致,证实了温度效应是导致测量偏差的主要原因。

通过对实验数据的深入分析,发现温度与辐照度读数之间存在明显的负相关关系。

3.2.3 可逆性验证

为排除传感器本身性能衰减的可能性,团队进行了对照实验:在相同条件下更换了多个不同批次的UV灯和UV能量传感器，结果观测到相似的变化趋势。

4 热管理策略与补偿方法研究

4.1 散热系统优化方案

针对UV固化设备的热管理问题，本研究调研并分析了多种散热方案及其适用场景。

（1）风冷散热方案

传统紫外线光源散热结构可采用内外双层壳体设计,形成优化的风路系统.外部冷空气通过外壳进风口进入,沿导流风道流动,通过安装壳进风口进入汞灯安装壳内,最后通过安装壳出风口进入风道腔体被抽出.风冷散热适用于中低功率UV系统，其优点为结构简单、成本低、维护方便，但散热效率有限，易导致冷却不均。

（2）水冷散热方案

对于高功率UV-LED固化系统，水冷散热方案显示出明显优势.水冷方式通过热对流,利用循环的冷却水将灯珠基板上的温度带走，特别适合高光强的UV-LED固化机长时间高强度工作.这类系统通常配备精密冷水机,能够将温度控制在5~30℃的精确范围内，确保UV光源和传感器工作在最佳温度环境。

4.2 间歇式测量策略

在传感器自身热管理方面,可采用间歇式测量方法避免传感器在高温环境下持续工作.具体的实施方案为:产品的UV照射时间为15~20秒，在此期间UV照度传感器暂停数据采集；每完成一个产品固化后，工装开仓，UV灯短暂开启1秒钟，传感器利用此短暂时间进行亮度采集。这种方法可有效防止传感器因长时间暴露在高温环境下而导致的性能漂移。

4.3 算法补偿方案

基于第三章的实验数据,本研究建立了温度—辐照度读数的数学补偿模型。根据表3.1所示的不同温度区间的变化率,可采用分段线性插值或多项式拟合方法实现实时补偿。补偿公式可表示为：

$$I_{corrected}=I_{measured}/(1+\alpha\cdot\Delta T)$$

其中，Icorrected为补偿后的辐照度值；Imeasured为传感器实测值；α为温度补偿系数（取值范围约为0.003~0.005/℃）；ΔT为当前温度与基准温度（20℃）的差值。对于高精度应用场景,可进一步引入二阶修正项或采用神经网络等智能算法进行非线性校正。

4.4 综合验证实验

为验证上述综合解决方案的有效性，研究团队在VR眼镜Speaker组装产线上进行了为期一个月的应用验证。验证实验采用水冷散热+温度补偿算法的复合方案。实验结果表明，采用复合补偿方案后，测量误差可控制在±3%以内，显著提升了UV固化工艺的稳定性和产品质量的可追溯性。固化工艺的良率从原来的95.2%提升至99.1%，效果显著。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文针对UV固化设备中温度对辐照度测量影响的问题，从机理分析,实验验证到解决方案设计开展了系统性的研究工作。主要研究结论如下：

温度对UV照度计测量精度的影响主要通过两条路径实现：暗电流的正温度系数效应（温度每升高8~10℃，暗电流约翻倍）和响应度的负温度系数效应（温度每升高1℃，响应度下降约0.1%),两者共同作用导致辐照度读数出现显著负偏差。

在无主动散热条件下，UV-LED固化系统工作10分钟后传感器温度即可达到93℃，导致UV能量计读数在相同辐照度条件下下降31.8%，且下降速率与温度呈非线性关系。

实验验证可有效解决温度漂移问题.采用复合补偿方案后，测量误差可控制在±3%以内，固化工艺良率提升近4个百分点。

5.2 研究展望

未来的研究工作可从以下方面展开：

开发具有内置温度补偿功能的专用UV传感器，从器件层面降低温度敏感性；

将温度补偿模块集成到MES系统中，实现工艺参数的智能优化和质量预测。

参考文献

[1] 王建国，张明华.UV固化技术在电子制造中的应用[J]. 粘接，2018，39（5）：32-36.

[2] 李伟，陈勇. 紫外光固化胶粘剂的固化机理研究进展[J]. 材料导报，2019，33（3）：45-52.

[3] 陈明. 林上科技.UV照度计的工作原理与校准技术[J]. 计量技术，2017（8）：15-19.

[4] 王凯，张伟. 硅光电二极管的温度特性研究[J]. 半导体光电，2016，37（4）：523-527.