

光热分层封装柔性可拉伸微型LED阵列器件

宁尉鸿 陈宇鹏 王惟彪 吕金光 郑凯丰 秦余欣 赵百轩 赵莹泽 聂海涛 朱俊鹏 孙鹏 陈晓宁 梁静秋

Flexible and stretchable Micro-LED array devices with Optical-Thermal layered packaging

NING Wei-hong, CHEN Yu-peng, WANG Wei-biao, LÜ Jin-guang, ZHENG Kai-feng, QIN Yu-xin, ZHAO Bai-xuan, ZHAO Ying-ze, NIE Hai-tao, ZHU Jun-peng, SUN Peng, CHEN Xiao-ning, LIANG Jing-qiu

引用本文:

宁尉鸿, 陈宇鹏, 王惟彪, 吕金光, 郑凯丰, 秦余欣, 赵百轩, 赵莹泽, 聂海涛, 朱俊鹏, 孙鹏, 陈晓宁, 梁静秋. 光热分层封装柔性可拉伸微型LED阵列器件[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0050

NING Wei-hong, CHEN Yu-peng, WANG Wei-biao, LÜ Jin-guang, ZHENG Kai-feng, QIN Yu-xin, ZHAO Bai-xuan, ZHAO Ying-ze, NIE Hai-tao, ZHU Jun-peng, SUN Peng, CHEN Xiao-ning, LIANG Jing-qiu. Flexible and stretchable Micro-LED array devices with Optical-Thermal layered packaging[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0050

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮化镓基Micro-LED侧壁对外量子效率的影响及侧壁处理技术综述

A review of the effect of GaN-Based Micro-LED sidewall on external quantum efficiency and sidewall treatment techniques
中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1305 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0091>

基于可拉伸光纤和干涉测量的振动传感器

Vibration sensor based on stretchable optical fiber and interferometric measurement
中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1200 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0010>

宽光束、高均匀性显示贴片灯珠的光学仿真设计

Optical simulation design of surface mounted device beads for wide beam and high uniformity display
中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 217 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0017>

Micro LED车灯投影光学系统设计与优化

Design and optimization of Micro LED vehicle light projection optical system
中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 89 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0063>

柔顺型光纤光栅水听器阵列理论与实验研究

Theoretical and experimental research on flexible fiber grating hydrophone array
中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 366 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0079>

Bi₂O₃/Bi₂S₃异质结材料的制备及其光电探测性能研究

Bi₂O₃/Bi₂S₃ heterojunction composite preparation and photodetection performance
中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1036 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0218>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-13

光热分层封装柔性可拉伸微型 LED 阵列器件

宁尉鸿^{1,2,3}, 陈宇鹏^{1,3}, 王惟彪^{1,3}, 吕金光^{1,3}, 郑凯丰^{1,3*}, 秦余欣^{1,3}, 赵百轩^{1,3}, 赵莹泽^{1,3},
聂海涛^{1,3}, 朱俊鹏^{1,2,3}, 孙 鹏^{1,2,3}, 陈晓宁^{1,2,3}, 梁静秋^{1,3*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:针对柔性可拉伸微型 LED 阵列器件在高电流密度下热积累严重, 以及传统导热填料易导致有机硅基体固化抑制的难题, 本文提出一种基于铂金催化改性的光热分层封装结构, 构建了集基底层散热反射、中层蛇形导电互连 LED 阵列及顶层透光功能于一体的 4×4 柔性可拉伸 LED 阵列。基底层采用 AlN 颗粒作为导热填料, 并引入铂金催化剂作为固化补偿剂, 实现了填充量 20 wt%、粒径 60 μm 的 AlN 在 Ecoflex 00-30 基体中均匀分散与完全固化。实验表明, AlN/Ecoflex 00-30 复合基底材料具备良好的热学与力学性能, 其热导率达 0.222 W/(m·K), 较纯 Ecoflex 00-30 提升了 35.4%, 且在 300% 的拉伸应变下仍保持结构完整。通过将高柔韧性的基底层与高拉伸度蛇形导电互连结构结合, 有效释放了机械形变过程中的应力, 保障了器件在动态弯曲下的电学连接可靠性。瞬态热阻测试表明, 采用光热分层封装的 LED 发光单元在 20 mA 恒定驱动电流下的稳态结温较纯 Ecoflex 00-30 封装降低 2.95 °C。验证了该方案在协同实现热管理与力学顺应性的可行性。

关键词: 柔性微型 LED 封装; AlN/Ecoflex 00-30 复合材料; 蛇形导电互连; 瞬态结温测试

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.3724/CO.2026-0050 CSTR: 32171.14.CO.2026-0050

Flexible and stretchable Micro-LED array devices with Optical-Thermal layered packaging

NING Wei-hong^{1,2,3}, CHEN Yu-peng^{1,3}, WANG Wei-biao^{1,3}, LÜ Jin-guang^{1,3}, ZHENG Kai-feng^{1,3*},
QIN Yu-xin^{1,3}, ZHAO Bai-xuan^{1,3}, ZHAO Ying-ze^{1,3}, NIE Hai-tao^{1,3}, ZHU Jun-peng^{1,2,3},
SUN Peng^{1,2,3}, CHEN Xiao-ning^{1,2,3}, LIANG Jing-qiu^{1,3*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhengkai-feng@ciomp.ac.cn; liangjq@ciomp.ac.cn

Abstract: Flexible and stretchable micro-LED arrays suffer from severe heat accumulation at high current

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20240302024GX); 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFB3604702)

Jilin Province Science and Technology Development Program (No. 20240302024GX); National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3604702)

densities. Conventional thermally conductive fillers can also inhibit curing of silicone matrices. We propose a platinum-catalyst-modified optical-thermal layered packaging structure to address both problems. A 4×4 flexible and stretchable LED array was fabricated. It integrates a heat-dissipating and light-reflecting substrate layer. The middle layer contains an LED array with serpentine conductive interconnects. A light-transmitting functional layer forms the top layer. AlN particles were used as thermally conductive fillers in the substrate. Additional platinum catalyst was introduced as a curing compensator. Uniform dispersion and complete curing were achieved at 20 wt% loading and 60 μm particle size. The composite substrate showed favorable thermal and mechanical properties. Its thermal conductivity reached 0.222 W/(m·K), 35.4% higher than pristine Ecoflex 00-30. It remained structurally intact under 300% tensile strain. The flexible substrate and serpentine interconnects effectively released stress during mechanical deformation. They maintained reliable electrical connections under dynamic bending. Transient thermal resistance tests were conducted at a constant driving current of 20 mA. The steady-state junction temperature was 2.95 °C lower than that of pristine Ecoflex 00-30 packaging. These results demonstrate effective thermal management while maintaining mechanical compliance.

Key words: flexible micro-LED packaging; AlN/Ecoflex 00-30 composites; serpentine conductive interconnect; transient junction temperature measurement

1 引言

随着物联网技术、数字化医疗监测以及沉浸式人机交互系统的快速发展,柔性电子技术正逐步重塑信息感知的物理形态^[1]。微型 LED 凭借其高响应速度、高亮度、低功耗以及优异的化学稳定性,发射波长可选择、阵列化集成度高以及光剂量易于调控等特点^[2-4],在光生物调节、光动力治疗和皮肤疾病辅助治疗等光疗领域展现出良好的应用潜力^[5-6]。柔性可拉伸微型 LED 阵列能够与人体皮肤或不规则组织表面形成共形贴合,有利于实现局部、均匀且可调控的光照,为可穿戴光疗器件的发展提供了新的技术路径。

然而,随着芯片尺寸减小,其功率密度急剧攀升,导致单位面积内的热流密度也随之显著增加,温升导致非辐射复合增强,使 LED 的量子效率下降、波长发生红移,还会诱发不可逆的热机械应力损伤,严重影响柔性光电器件的可靠性与稳定性^[7-8]。此外,为满足可穿戴设备对人体工学舒适度与大形变的需求,微型 LED 需集成于低模量、高延展性的有机硅弹性体材料(如 Ecoflex、PDMS 等)的封装基底上^[9],这类高分子材料属于热的不良导体,本征热导率约为 0.1~0.2 W/m·K^[10]。因此,柔性材料的低热导率特性与微型 LED 急剧攀升的热流密度导致的热积累效应成为制约柔性封

装微型 LED 阵列器件性能与可靠性的瓶颈。

目前,相关研究主要从芯片结构优化、高导热材料应用、系统级散热设计以及智能热管理等方面来控制微型 LED 的温升^[11-13]。在基体部分提供高效的导热通道,实现芯片热量的快速导出,是控制器件温升的有效方法之一。但通用的散热方案难以满足柔性可拉伸微型 LED 阵列器件对散热与力学顺应性的双重需求。

为了解决柔性可拉伸微型 LED 的散热与力学顺应性之间的矛盾,本文提出一种光热分层封装柔性可拉伸微型 LED 阵列结构。该结构以 Ecoflex 00-30 硅胶作为柔性基体,引入高热导率且电绝缘的氮化铝(AlN)颗粒作为导热填料。针对 AlN 表面活性基团引发的加成型硅胶固化抑制问题^[14],采用铂金催化剂对 AlN 表面进行化学改性,以改善无机填料在基体中的交联状态。在此基础上,研究了基于 AlN 复合材料基底的柔性可拉伸 LED 制备方法,并实验分析了 AlN 复合材料的浓度、粒径等因素对基底热导率的影响。

2 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件结构及复合基底研究

2.1 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件结构设计

为满足器件光输出、热耗散及力学顺应性等

特性要求, 本文构建了集基底层散热反射、中层蛇形导电互连 LED 阵列发光及顶层透光功能于一体的光热分层 4×4 柔性可拉伸 LED 阵列结构, 如图 1 所示, 其中, 图 1(a) 为 4×4 柔性可拉伸微型 LED 阵列的俯视图, 图 1(b) 为器件的三维结构图。其中基底层为改性 AIN/Ecoflex 00-30 复合材料, 作为散热与反射层, 能够在保证微型 LED

阵列拉伸性能的同时将微型 LED 点热源产生的热量迅速沿平面方向进行横向扩散, 抑制局部热积累。同时, 得益于 AIN 粉体天然的漫反射特征, 该层还可作为反光背底, 将向下传输的光线反射导出, 相较于纯透明硅胶基底, 该设计可以有效提升器件的光能利用率。

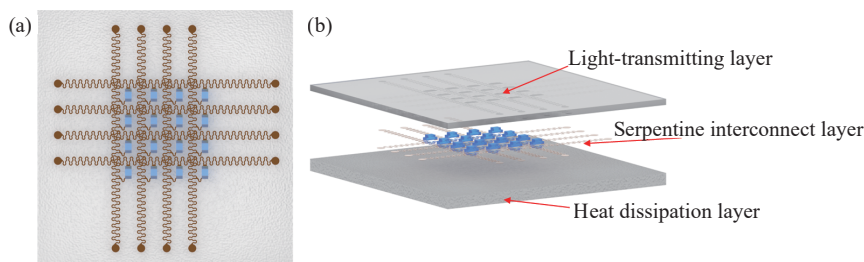


图 1 光热分层柔性可拉伸微型 LED 阵列结构示意图。(a) 4×4 阵列正视图; (b) 器件结构分解图

Fig. 1 Schematic of the optical-thermal layered flexible and stretchable micro-LED array. (a) Front view of the 4×4 array; (b) three-dimensional structure of the device

中间层为集成了 LED 芯片的蛇形导电互连电路。考虑到阵列器件需承受拉伸、弯曲及扭转等复杂机械形变, 本研究将互连导线设计为蛇形几何结构(图 1(a))。蛇形结构具有独特的力学顺应性, 在外部拉伸载荷作用下, 能够通过平面内的旋转与弯曲变形有效释放应力^[15], 从而有效降低焊盘与芯片连接点的应力水平, 确保电路连接的可靠性^[16]。

顶层采用纯 Ecoflex 00-30 硅胶, 其具有的高透过率和低杨氏模量使其成为理想的光学透射与力学缓冲层。该层与基底层共同保护中间层的电路及芯片, 使其在弯曲、扭转以及拉伸状态下不受损伤。

2.2 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件复合基底研究

柔性可拉伸微型 LED 阵列器件的基底作为承载核心, 需在满足优良电绝缘性的前提下, 兼顾大应变下的力学顺应性与高效的热传导能力。在材料选择方面, 双组分加成型室温硫化硅橡胶 Ecoflex 00-30 因其固化后具有低杨氏模量与优异的延展性, 可以与人体皮肤形成良好的共形贴附, 是制作柔性基体的优选材料。同时, 氮化铝 (AlN) 材料因其具有高热导率 (约 $320 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) 以及良好的电绝缘特性, 使之成为导热填料的理想选择^[17]。然而, 当无机陶瓷体系与有机弹性体复

合时, 存在两个突出问题, 即催化剂竞争性中毒导致的固化抑制效应, 以及导热网络构建与聚合物力学柔韧性相互制约的问题。

其中, 固化抑制效应产生的原因是 AIN 粉体在合成与存储过程中, 表面极易发生局部水解反应, 残留活性基团。在加成型有机硅体系中, 这些活性基团会与预置的铂金 (Pt) 催化剂发生竞争性络合反应, 抑制硅胶固化过程。为此, 本文提出采用铂金催化改性方案, 即在制备过程中额外添加标称浓度为 2000 ppm 的铂金催化剂作为固化补偿剂, 由铂金离子优先中和 AIN 表面的活性基团, 削弱其对硅氢加成反应的干扰。实验结果表明, 在相同 AIN 填充量、填料粒径、混合工艺和固化条件下, 引入铂金催化剂后, AIN/Ecoflex 00-30 复合材料的固化抑制现象明显减弱, 固化效果明显改善。图 2 给出了有无固化补偿剂两种情况下复合材料的光学显微照片。图 2(a) 所示的未添加固化补偿剂的复合材料, 硅氢加成反应严重受阻, 复合材料界面呈现出明显未完全交联的粘性液态层, 微观结构疏松, 无法保障器件封装的力学可靠性。图 2(b) 所示的添加补偿剂后的复合材料具有更致密的表面形貌, 未固化区域消失, 无机填料分布均匀。

对两组样品在相同固化条件下的固化过程进行观察, 结果表明: 在 60°C 固化 40 min 后, 添加

固化补偿剂的样品已完全固化且可正常脱模;而未添加固化补偿剂的样品在 2 h 后仍呈现明显粘滞状态,6 h 后表面仍存在局部未固化区域,24 h 后,样品虽整体呈固态,但表面仍具粘性。通过以上研究,本文选用添加铂金催化剂的 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料制备复合基底层。

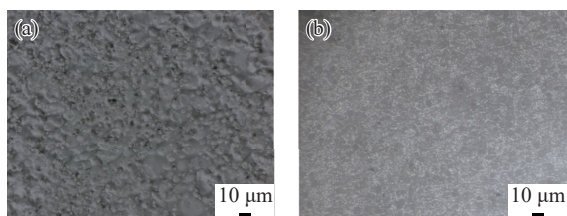


图2 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料光学显微图。(a) 未添加固化补偿剂;(b) 添加固化补偿剂

Fig. 2 Optical micrographs of AlN/Ecoflex 00-30 composites. (a) Without curing compensator; (b) With curing compensator

此外,针对传统填充改性中热学性能提升往往以牺牲力学柔韧性为代价的问题,分析了 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料的导热机理。由 Hasselman-Johnson 有效介质模型,填料粒径与复合材料导热性能的关系如式(1)所示,在球形无机颗粒掺杂的聚合物复合体系中,单颗粒填料的有效热导率 k_f^{eff} 可表达为:

$$k_f^{eff} = \frac{k_f}{1 + \frac{2R_k k_f}{D}}, \quad (1)$$

式中, k_f 为 AlN 填料的本征晶格热导率(单位: W/m·K); D 为填料的等效平均直径(单位: m); R_k 为由声学失配引起的 Kapitza 界面热阻(单位: m²·K/W)。当界面热阻 R_k 客观存在时,大粒径填料因其更低的比表面积,可削减公式分母中 $\frac{2R_k k_f}{D}$ 的数值,增大有效热导率 k_f^{eff} 。

进一步,复合柔性基底的总有效热导率 k_{eff} 与基体热导率 k_m 及填料体积分数 V_f 的关系满足:

$$k_{eff} = k_m \left[\frac{2k_m + k_f^{eff} - 2V_f(k_m - k_f^{eff})}{2k_m + k_f^{eff} + V_f(k_m - k_f^{eff})} \right], \quad (2)$$

相同质量分数条件下,大粒径填料可以减少聚合物-无机物界面的面积,从而有效抑制界面处的声子散射,降低界面接触热阻(Kapitza 热阻)^[18]。因此,大粒径填料有利于提升复合材料的导热性能。在相同质量分数条件下,大粒径使得刚性无

机填料在柔性基体中呈离散分布状态,保留了硅胶 Ecoflex 00-30 分子链在大变形下的构象重排能力,从而有效避免应力集中源的产生,使复合材料保持良好的力学柔韧性。

AlN/Ecoflex 00-30 复合材料的制备工艺为:首先,将 Ecoflex 00-30 的 A 组分与 AlN 粉体按质量比混合,并同步滴加 2000 ppm 铂金催化剂,利用机械搅拌器以 500 rpm 转速充分分散 10 min 以消除固化抑制效应;然后,加入等质量 Ecoflex 00-30 的 B 组分继续搅拌 5 min 至均匀。为了消除混合过程中引入的微气孔,将浆料置于真空干燥箱中,在-0.1 MPa 压力(表压)下进行 10 min 的脱泡处理。最后,将浆料置于模具中,于 60 °C 环境下热固化 40 min,得到成型完整且填料分布均匀的柔性 AlN/Ecoflex 00-30 复合基底。其中,真空脱泡和充分固化是保证复合基底性能稳定的关键步骤。脱泡不充分会使材料内部残留气孔,削弱热传导路径并形成力学应力集中点;固化不足则会影响 Ecoflex 00-30 基体交联完整性和填料-基体界面结合状态,进而影响热导率和力学稳定性。

2.3 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件复合基底测试

2.3.1 基于李氏盘法与双厚度校准的稳态热导率测量

针对软质有机硅复合材料在热学测试中面临的低热导率、易变形以及界面接触热阻干扰等问题,本研究依据傅里叶一维稳态导热定律,自行搭建了集成热阻尼滤波功能的李氏盘测试系统。

该装置采用自上而下的垂直堆叠传热结构,如图 3 所示。自上而下各层依次为:第一层为 PI 加热膜,用于提供稳定热输入;第二层为第一匀热板,用于促进热量在面内扩散,减弱加热膜局部温度不均;第三层为纯 Ecoflex 00-30 硅胶热缓冲层,用于减弱加热端温度波动对传热过程的影响;第四层为第二匀热板,用于进一步均化进入试样上表面的热流;第五层为待测 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料试样;第六层为散热铜板,用于将通过试样传递至下端的热量散入到环境中,并与上端热源共同建立沿试样厚度方向的稳定传热路径。实验过程中,在加热端、试样上表面和试样下表面分别布置温度传感器,并通过多通道温度采集仪实时记录温度变化。待系统达到稳态后,根据试

样上下表面温差、试样厚度、有效传热面积及通过试样的热流计算材料热导率。

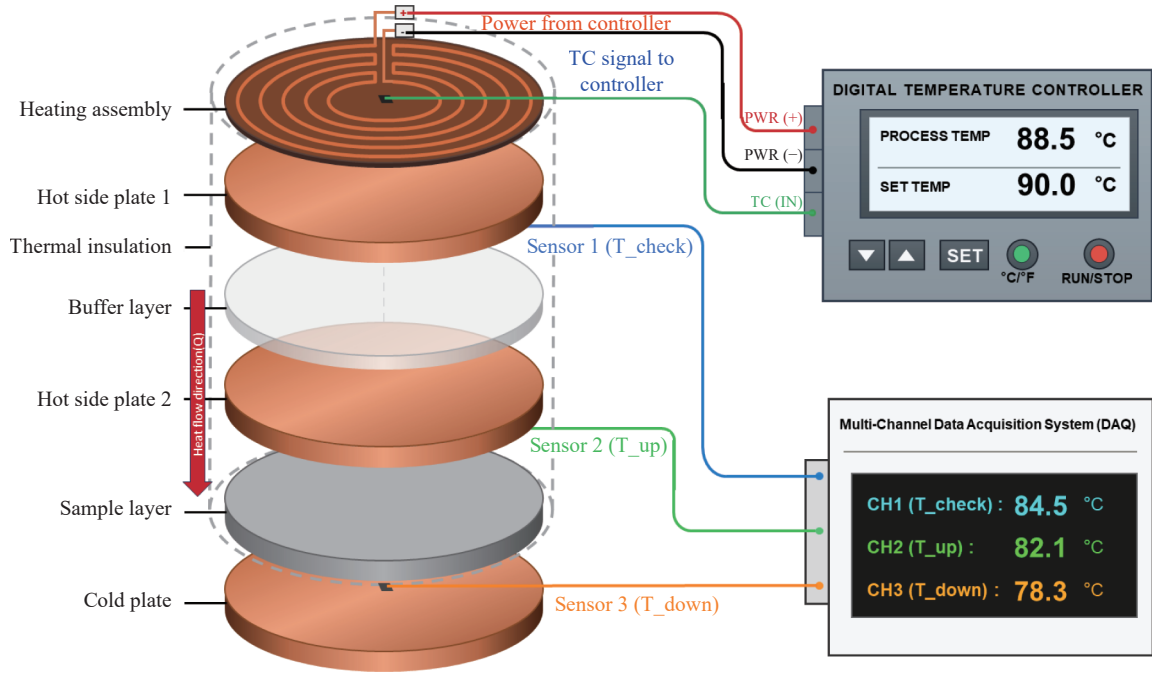


图3 李氏盘稳态热导率测试系统结构示意图

Fig. 3 Schematic of the Lee's disk steady-state thermal conductivity measurement system

在数据处理与误差修正方面,软质复合薄膜与紫铜板之间不可避免存在固-固接触热阻(R_c),即使涂抹导热硅脂与施加轴向预紧力也难以完全消除。若直接利用总热阻进行换算,将低估材料的导热性能。因此,本研究参考 ASTM D5470-17 规范^[19],采用双厚度差分法建立热阻模型,以减小接触热阻对测试结果的干扰。根据一维热阻串联模型,测试系统测得的总热阻 R_{total} (单位: K/W)由材料的体热阻 R_{bulk} 与上下表面的接触热阻 $2R_c$ 构成。假设在恒定的轴向预紧力下,接触热阻 R_c 为常数,则对于厚度为 d 、有效传热面积为 S 的试样,其热阻方程可表达为:

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{d}{k \cdot S} + 2R_c, \quad (3)$$

式中, ΔT 为试样上下表面的稳态温差(单位: K), Q 为流经试样的热通量(单位: W), k 为待测材料的热导率(单位: W/(m·K))。为求解该方程中的未知量 k 与 R_c ,实验制备了同种配方但厚度分别为 $d_1=2$ mm 和 $d_2=3$ mm,直径为 60 mm 的两组试样。通过测量两组试样的总热阻(R_{total1} 与 R_{total2})并联立方程,即可消除接触热阻项 $2R_c$,从而推导出热导率的计算公式:

$$k = \frac{d_2 - d_1}{S(R_{total2} - R_{total1})}. \quad (4)$$

在完成双厚度法校准后,对 AIN/Ecoflex 00-30 复合材料的热导率进行测试。测试样品均为直径 60 mm,厚度 2mm 的圆形薄片,测试环境温度为 22.4 °C,波动范围为 ± 0.2 °C。每组样品重复测试 3 次,结果取平均值。

为分析 AIN 质量分数对复合材料热导率的影响,在固定 AIN 粒径为 1 μ m 的条件下,分别测试了 0、4 wt%、8 wt%、12 wt%、16 wt%、20 wt% 和 25 wt% 质量分数下 AIN/Ecoflex 00-30 复合材料的热导率,结果如图 4 所示。随着 AIN 质量分数增加,复合材料热导率整体呈上升趋势。0、4 wt%、8 wt%、12 wt%、16 wt%、20 wt% 和 25 wt% 样品的平均热导率分别为 0.164 W/(m·K)、0.170 W/(m·K)、0.185 W/(m·K)、0.188 W/(m·K)、0.191 W/(m·K)、0.203 W/(m·K) 和 0.204 W/(m·K)。当 AIN 质量分数由 0 增加至 20 wt% 时,复合材料热导率由 0.164 W/(m·K) 提高至 0.203 W/(m·K),提升约 23.6%,表明 AIN 填料能够改善 Ecoflex 00-30 基体的热传导能力。当质量分数进一步增加至 25 wt% 时,复合材料热导率仅提高至 0.204 W/(m·K),相较于 20 wt% 样品增幅不足 1%,

同时,实验制备过程中观察到,25 wt% 样品的浆料出现一定程度的填料团聚现象,不利于柔性基底的均匀成型。因此,20 wt% 填充量在热导率提升和浆料成型状态之间具有较好的平衡。

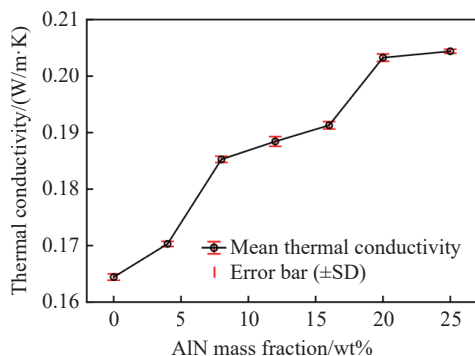


图4 1 μm 粒径 AlN 填料不同质量分数下 AlN/Ecoflex 00-30 复合基底热导率测试结果

Fig. 4 Thermal conductivity of AlN/Ecoflex 00-30 composite substrates at different AlN mass fractions using 1 μm AlN fillers

在此基础上,本文将 20 wt% 作为后续粒径影响实验的固定质量分数,进一步考察 AlN 填料粒径对复合材料热输运性能的影响,分别测试了 1 μm 、5 μm 、15 μm 和 60 μm 粒径 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料的热导率,结果如图 5 所示。随着 AlN 粒径增大,复合材料热导率逐步提高。1 μm 、5 μm 、15 μm 和 60 μm 粒径样品的热导率分别为 0.203 W/(m·K)、0.205 W/(m·K)、0.211 W/(m·K) 和 0.222 W/(m·K)。其中,60 μm 粒径样品的热导率最高,达到 0.222 W/(m·K),相较于热导率为 0.164 W/(m·K) 的纯 Ecoflex 00-30 提高 35.4%,较 1 μm 粒径样品提高约 9.4%。

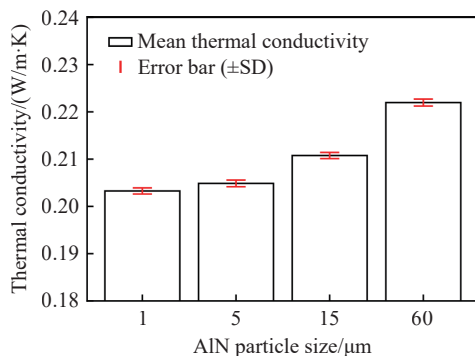


图5 固定 20 wt% 质量分数下不同 AlN 粒径 AlN/Ecoflex 00-30 复合基底热导率测试结果

Fig. 5 Thermal conductivity of AlN/Ecoflex 00-30 composite substrates with different AlN particle sizes at a fixed mass fraction of 20 wt%

上述结果表明,在相同质量分数下,增大 AlN 填料粒径有利于提升 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料的热输运能力。这主要是由于大粒径填料具有较低的比表面积,可减少聚合物基体与无机填料之间的界面总面积,从而降低界面 Kapitza 热阻,使热量更易通过 AlN 颗粒传递。因此在本文测试范围内,综合导热性能、材料成型状态和柔性封装需求,选用 20 wt%、60 μm AlN/Ecoflex 00-30 作为后续器件封装实验配方。

2.3.2 复合基底的单轴拉伸测试

作为柔性可拉伸 LED 阵列器件的基底,满足力学顺应性是十分重要的。本文选用 20 wt%、60 μm AlN/Ecoflex 00-30 作为复合基底材料,遵循 ASTM D412 Type C 标准^[20]及测试需求制备了哑铃状拉伸试样。试样的几何参数与实物照片如图 6(a) 与图 6(b) 所示,其标距长度为 33 mm,标距宽度为 6 mm,厚度为 3 mm,夹持过渡区的圆弧半径为 5 mm。

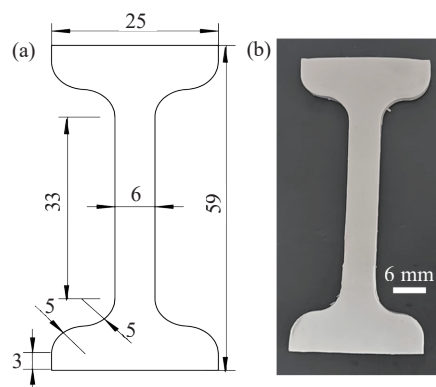


图6 单轴拉伸。(a) 试样几何尺寸参数 (单位: mm); (b) 制备的实体试样

Fig. 6 Uniaxial tensile test. (a) Geometric dimensions of the specimen (unit: mm); (b) photograph of the prepared specimen

利用配备力传感器的材料试验机,以 60 mm/min 的拉伸速率对试样进行准静态单轴拉伸试验。如图 7 所示,测得的应力-应变曲线表明,该复合基底展现出非线性力学特征,在承受高达 300% 的工程拉伸应变时,样品仍未发生脆性断裂或颈缩现象,且卸载后能够迅速回复至初始几何参数。如图 7(a-d) 的第 1 次、第 5 次、第 20 次及第 50 次循环加载过程中的应力-应变迟滞曲线所示,在多周期的循环加载测试中,材料的应力-应变曲线呈现出迟滞环。随着循环次数的增加,迟

滞环面积趋于稳定, 且残余应变几乎可以忽略, 表明材料内部未发生大面积的填料、基体界面脱粘或不可逆的微观结构损伤, 硬质 AlN 颗粒在基体中未形成连续的刚性逾渗网络, 样品在承受外部

机械载荷时, 输入的变形功主要通过低模量有机硅基体内部分子链的伸展、滑移及构象重排所产生的内摩擦进行耗散。

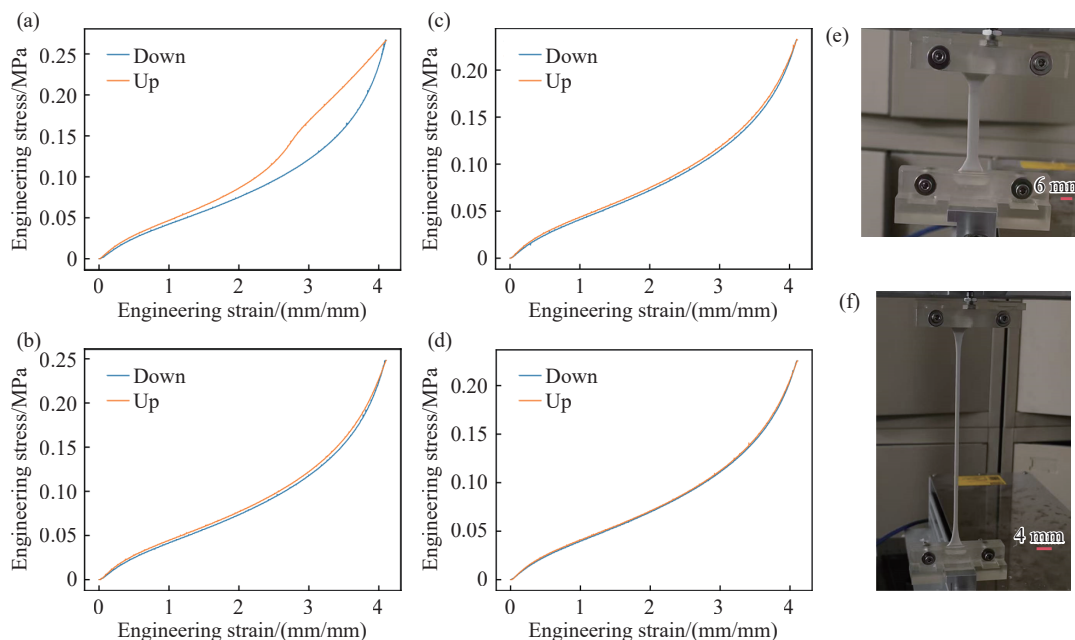


图 7 多周期循环单轴拉伸测试结果。(a)-(d) 分别对应第 1 次、第 5 次、第 20 次及第 50 次循环加载过程中的应力-应变迟滞曲线; (e) 单轴拉伸初始状态; (f) 单轴拉伸 300% 状态

Fig. 7 Multi-cycle uniaxial tensile test results. (a)-(d) Stress-strain hysteresis curves for the 1st, 5th, 20th, and 50th cycles, respectively; (e) initial state of the specimen; (f) specimen at 300% tensile strain

3 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件制备及 LED 动态结温测试研究

3.1 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件制备与测试

3.1.1 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件制作工艺

本研究基于微机电系统加工工艺, 制备了集成 4×4 像素单元的柔性可拉伸 LED 阵列。本文以 0603 封装的蓝光 LED 作为原理验证对象, 探究光热分层封装结构对发光单元光热性能的改善作用, 相关结果可为微型 LED 阵列的柔性封装与热管理设计提供参考。针对微米级线宽的蛇形互连导线在脱离刚性生长基底后易发生机械屈曲或断裂的问题, 本研究采用了“顶层预封装-基底刻蚀转移-基底层散热封装”的工艺路线(如图 8), 以降低中间态机械损伤风险, 并有助于保持阵列器件的电学连接稳定性与层间结合状态。

具体制备工艺流程如图 8 所示, ①制备底层

电极: 首先在玻璃基板上旋涂厚度 $20 \mu\text{m}$ 的非光敏 PI 胶并固化, 并在 PI 层上先后沉积铝和铜薄膜, 其中铝薄膜将在后面的工艺步骤中氧化形成氧化铝作为 PI 刻蚀掩膜, 铜膜作为电铸的种子层; 然后制备电极的厚光刻胶掩膜, 电铸第一层电极, 去除光刻胶, 干法刻蚀去除种子层, 留下底层电极; ②制备上层电极: 首先旋涂光敏 PI 作为绝缘层覆盖底层电极, 随后光刻露出底电极的焊盘; 然后按照底电极的制作方法光刻电铸制作上层电极; ③芯片集成及顶层封装: 首先采用回流焊工艺完成 LED 焊接, 然后进行顶层光学缓冲层的封装, 将纯 Ecoflex 00-30 硅胶预聚体真空脱泡后, 涂覆于阵列器件表面, 厚度 $\leq 1 \text{ mm}$, 室温固化后形成具有高透光率的顶部保护层。最后, 将器件从玻璃基板上剥离, 用化学刻蚀工艺定向去除底层的 PI 支撑基底, 暴露出金属导线与 LED 焊盘, 将热源物理接触面完全裸露, 为构建低接触热阻的传热通道创造了前提条件。④散热反射基底层

封装: 将制备好的 20 wt% 60 μm AlN/Ecoflex 00-30 改性复合浆料涂覆于裸露的电路背部, 通过真空辅助确保浆料充分填充蛇形导线间隙并与芯片底部焊盘实现共形贴合。在 60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下固化成

型为厚度约 1 mm 的散热基底层。该复合层利用 AlN 的高导热与漫反射特性, 充当了器件的热扩展基底与光学反射背底, 制备所得的器件如图 9(a)所示。

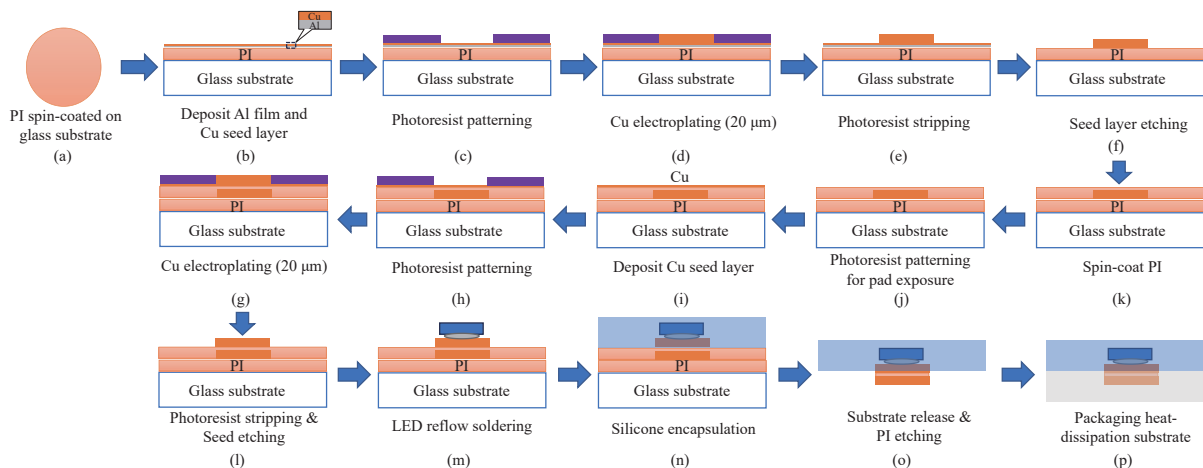


图 8 柔性可拉伸微 LED 阵列的制备工艺流程

Fig. 8 Fabrication process flow for the flexible and stretchable micro-LED array

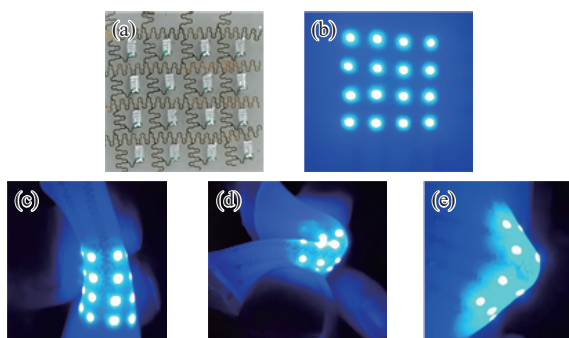


图 9 柔性 LED 阵列器件与发光状态(a)柔性 LED 阵列器件图; (b)阵列点亮图; (c)单折叠发光图; (d)双折叠发光图; (e)锥状形变发光图

Fig. 9 Flexible LED array device and its light-emitting states. (a) Flexible LED array device; (b) illuminated array; (c) light emission under single folding; (d) light emission under double folding; (e) light emission under conical deformation

3.1.2 柔性可拉伸微型 LED 阵列器件测试

采用索雷博 PM400 光功率计在暗室中测量了 LED 阵列器件分别采用纯硅胶基底和散热基底封装时前向特定位置处的光接收功率密度变化。环境温度为 22.4 ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$, 器件采用 160 mA 恒流驱动, 探头与器件发光面距离为 70 mm。每组样品连续测试 5 次, 结果取平均值, 测量数据如表 1 所示。测量结果表明, 封装 AlN/Ecoflex 00-

30 散热基底层后, 发光单元在出光方向上的平均光功率密度由封装前的 $1.75978 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 提高至 $2.03442 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 提升了约 15.6%。这是因为大量的 $60\mu\text{m}$ 粒径 AlN 颗粒在硅胶中形成高散射体积层, LED 阵列发出的背向光, 以及封装层界面反射回的背向光在进入该层后, 会在 AlN 颗粒界面发生多次反射、折射和散射, 使一部分背向光重新进入前向出光方向, 从而提高了柔性 LED 阵列的前向光功率。

表 1 LED 阵列器件封装散热基底层和未封装 5 次光功率密度测试结果 (单位: mW/cm^2)

Tab. 1 Five optical power density measurements of the LED array device with and without heat-dissipating substrate encapsulation (unit: mW/cm^2)

	1	2	3	4	5	平均值
封装	2.0406	2.0347	2.0312	2.0317	2.0339	2.03442
未封装	1.7641	1.7595	1.7583	1.7622	1.7548	1.75978

为进一步评估封装后柔性 LED 阵列器件的性能, 对器件进行了不同形变状态下的点亮测试。图 9(b-e)分别给出了器件的平面状态、折叠状态、弯曲状态和锥状形变状态下的点亮效果, 从图中可以看出在各种形变条件下即使二级蛇形电极已发生明显变形, 器件的发光亮度依然没有

明显衰减, 保持较为稳定的发光状态, 且在测试停止后可以恢复到初始状态。

3.2 柔性封装发光单元动态结温测试研究

为了无损定量评估柔性封装器件的内部热管理性能, 本研究构建了基于电学法的瞬态热阻测试系统。该系统遵循 JESD51-1 静态测试标准^[21], 利用 LED 芯片自身 PN 结的正向电压 (V_f) 作为温敏参数反演结温。

3.2.1 温敏参数 K 因子标定与线性度验证

K 因子的准确标定是后续所有结温数据可信度的物理基础。根据半导体物理理论, 在恒定小电流注入条件下, LED PN 结的正向电压与结温之间应遵循严格的线性依赖关系^[22]。为定量描述这一物理过程, 根据理想二极管方程及载流子复合理论, 在微小恒定传感电流 I_{sensor} 驱动下, PN 结的正向电压 V_f 与宏观结温 T_j 的本构关系可由一阶泰勒展开作线性近似:

$$V_f(T_j) = V_f(T_0) + K \cdot (T_j - T_0) \quad (5)$$

式中, T_0 为系统的初始参考温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$); $V_f(T_0)$ 为在参考温度 T_0 及小电流驱动下的初始正向压降 (单位: V); K 即为材料热-电耦合特性的温敏参数 ($K = \frac{\partial V_f}{\partial T_j}$, 单位: $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$)。从上述公式可知, 通过获取不同温度节点下高度稳定的稳态 V_f , 即可通过线性回归拟合获取 K 因子。

在实验测量环境的选择上, 考虑到 Ecoflex 00-30 有机硅胶基体在传统液体油浴环境中易发生溶胀或吸湿, 从而引发介电参数漂移, 本研究设计并搭建了基于双面主动加热-热阻尼缓冲-中心均温层级架构的固态 K 因子标定系统。如图 10 的系统原理图所示, 该系统采用高精度源表作为集成功率源与测量计, 通过开尔文四线制连接方式有效消除了引线电阻与接触电阻引入的电压测量误差。

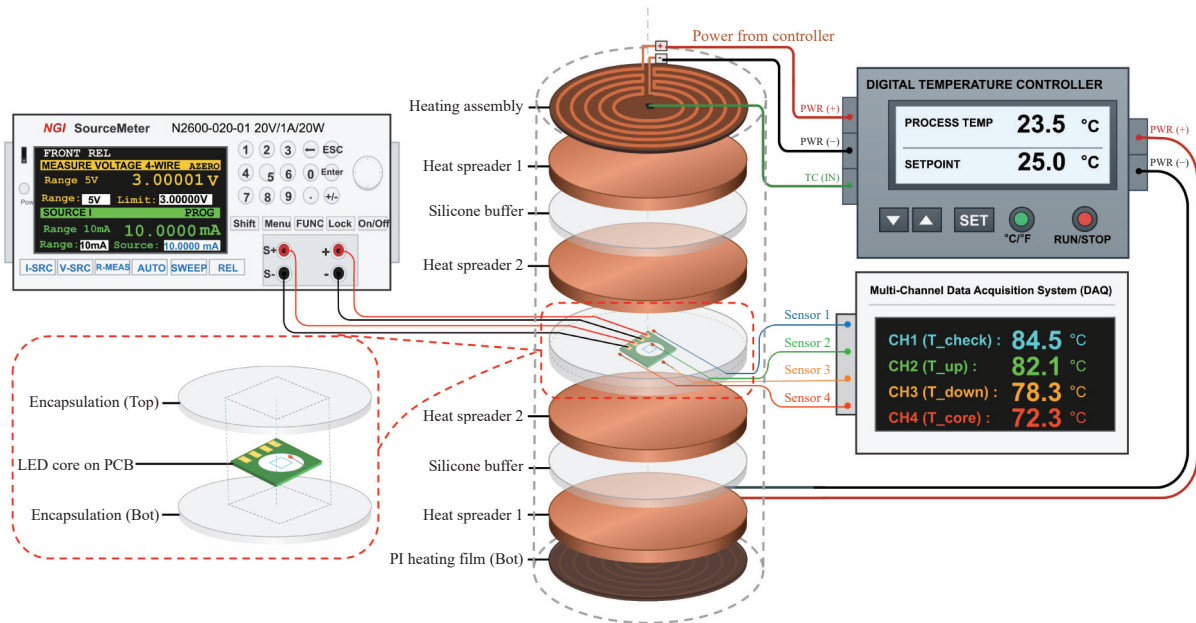


图 10 基于“双面主动加热-热阻尼缓冲-中心均温”架构的柔性器件固态 K 因子标定系统原理图

Fig. 10 Schematic of the solid-state K -factor calibration system for flexible devices based on "bilateral active heating, thermal damping buffering, and central temperature equalization"

标定过程在 25°C 至 110°C 区间内进行, 采用阶梯式加热。为了确保电压-温度 ($V_f - T_j$) 映射关系的准确, 当系统在达到每个设定的目标温度节点后, 待整个层级传热与芯片核心达到热学稳态, 再进行电压同步测量与读数。实验结果如图 11 所示, LED 单元在全温区内表现出良好的

线性度, 其线性相关系数 (R^2) 均严格大于 0.999, 温度灵敏度 K 值高度一致, 稳定分布在 $-1.13 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 至 $-1.15 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 之间。这种高度线性的映射响应验证了固态标定系统的均温稳定性和 LED 芯片的热-电响应一致性, 为后续瞬态热阻测试的结温反演确立了高置信度的基准参数。

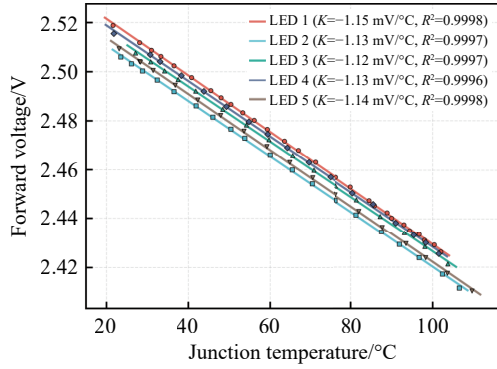


图 11 LED 的正向电压-结温 ($V_f - T_j$) 标定拟合曲线

Fig. 11 Calibration and fitted curves of LED forward voltage versus junction temperature ($V_f - T_j$)

3.2.2 瞬态热响应分析与稳态结温评估

利用标定所得的 K 因子, 本研究采用方波扫描法对不同封装材料体系的 LED 单元进行了热-电耦合瞬态测试。如图 12 的测试时序逻辑与控制原理图所示: 在加热阶段 ($t_{\text{heating}} = 3000 \text{ ms}$), 向封装单元注入 $I_{\text{heat}} = 20 \text{ mA}$ 的恒定驱动电流, 以精确模拟器件在真实应用场景中的额定发热工况; 在测量阶段, 电流在毫秒级时间内被迅速切断, 并无缝切换至 $I_{\text{sensor}} = 0.1 \text{ mA}$ 的微小传感电流 ($t_{\text{measurement}} = 50 \text{ ms}$), 使系统以高采样率实时记录器件在冷却瞬态的电压响应曲线 ($V_f(t)$), 从而准确获得芯片温度。

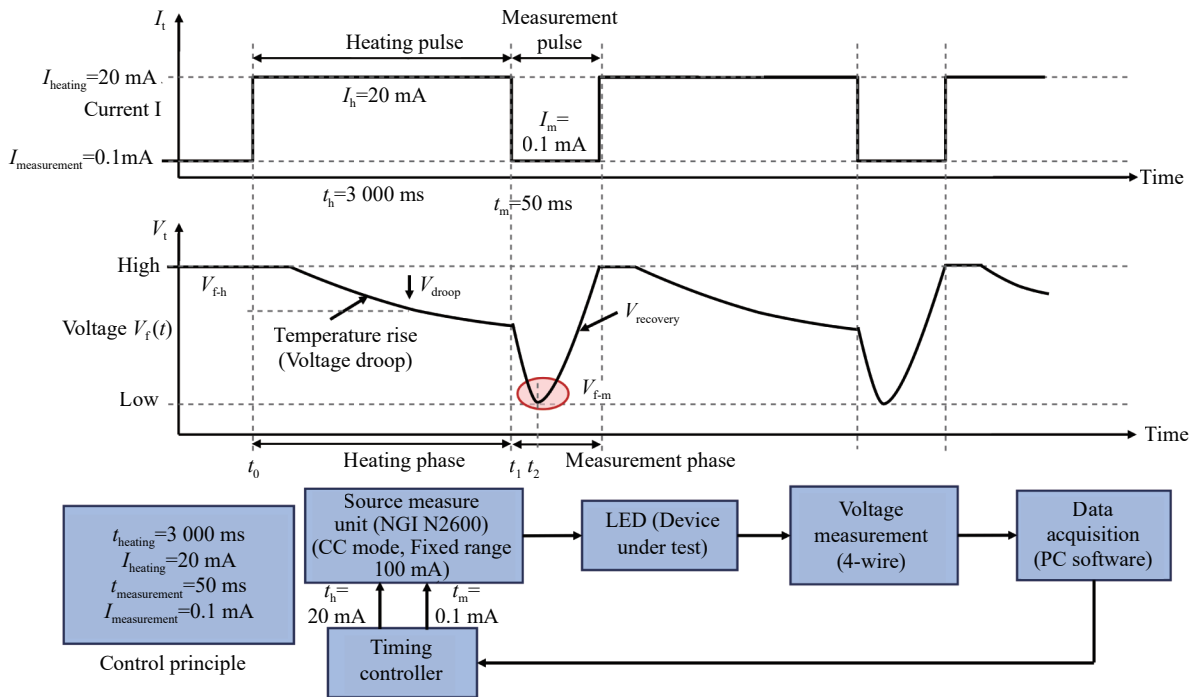


图 12 方波扫描热-电耦合瞬态测温原理与时序控制逻辑图

Fig. 12 Schematic of the principle and timing control logic for square-wave scanning thermo-electric coupled transient temperature measurement

为了将采集到的瞬态电学信号转化为直观的热学参数, 根据热-电耦合物理理论, 任意 t 时刻的瞬态结温 $T_j(t)$ 可由下述公式计算得出:

$$T_j(t) = T_a + \frac{V_{f,\text{sensor}}(t) - V_{f0}}{K}, \quad (6)$$

式中, T_a 为测试环境的初始恒定基准温度 (通常等于 t_0 时刻的结温, 单位: $^{\circ}\text{C}$); V_{f0} 为芯片在达到热平衡前 (即未施加加热电流前), 仅由 I_{sensor} 驱动时测得的初始正向电压 (单位: V); $V_{f,\text{sensor}}(t)$ 为撤去

加热脉冲后, 在传感脉冲窗口内实时采集的正向电压; K 为已标定好的温敏系数 (单位: $\text{V}/^{\circ}\text{C}$)。

基于上述过程, 测试并计算了 LED 的瞬态热响应。测试在 $22.4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下进行, 器件采用 20 mA 电流驱动, 单次测试时间不低于 30 min , 待热响应曲线进入稳定阶段后取稳态结温进行比较。图 13 是不同基底封装材料热-电耦合测试结果, 其中纯 Ecoflex 00-30 基底层封装发光单元的稳态结温波动范围为 0.34°C , AIN/Ecoflex 00-30 导热复合基底层封装发光单元的稳态

结温波动范围为 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Ecoflex 00-30 封装器件在通电瞬间结温急剧上升, 且建立热平衡的迟滞时间较长; 而得益于改性封装层的导热性能, AlN/Ecoflex 00-30 器件的升温曲线斜率 (dT_j/dt) 明显变缓, 且能够更快地进入稳态热耗散阶段。在相同的环境温度与电学驱动条件下, 采用 20wt% $60\mu\text{m}$ AlN/Ecoflex 00-30 基层封装的器件, 其稳态结温相较于纯 Ecoflex 00-30 封装降低了 $2.95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 结果如图 14 所示。

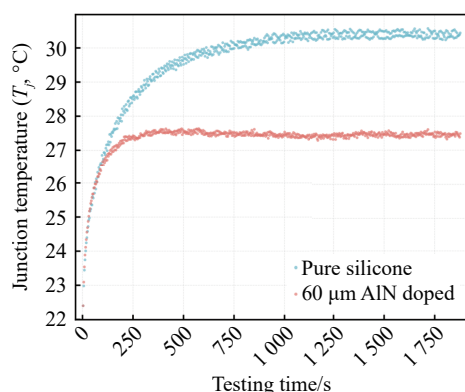


图 13 不同基底封装材料发光单元的热-电耦合测试结果对比

Fig. 13 Comparison of thermo-electric coupled test results for LED devices with different substrate encapsulation materials

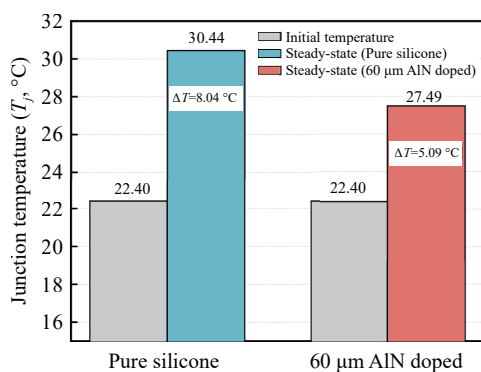


图 14 不同基底封装材料发光单元达到热学平衡后的稳态结温 (T_j) 与净温升 (ΔT)

Fig. 14 Steady-state junction temperature (T_j) and net temperature rise (ΔT) of LED devices with different substrate encapsulation materials after reaching thermal equilibrium

这一结果表明, 器件底部的接触热阻与扩散热阻得到了有效降低, 这归因于微米级 AlN 填料对柔性基体材料的导热性能的提升, 使芯片热源与外界环境的热阻降低, 发光单元稳态结温下降,

有效抑制了工作过程中的热积累。在保证柔性力学特征的同时, 提高了柔性光电子器件的热可靠性。

为对比纯 Ecoflex 00-30 封装和 AlN/Ecoflex 00-30 复合封装对发光单元波长稳定性的影响, 利用光谱仪对两种基底封装形式下发光单元稳定工作状态下的峰值波长进行测试。每种封装形式重复测试 5 次, 结果取平均值。

测试结果如图 15 所示, 纯 Ecoflex 00-30 基层封装发光单元的平均峰值波长由 458.794 nm 红移至 459.389 nm , 平均红移量为 0.595 nm ; AlN/Ecoflex 00-30 导热复合基底封装发光单元的平均峰值波长由 458.746 nm 红移至 459.199 nm , 平均红移量为 0.453 nm 。与纯 Ecoflex 00-30 基层封装发光单元相比, AlN/Ecoflex 00-30 导热复合基底封装发光单元的平均峰值红移量减小 0.142 nm 。发光单元稳态结温降低不仅能抑制蓝光 LED 连续工作过程中的峰值波长红移, 还能提高发光效率, 提高 LED 的寿命。

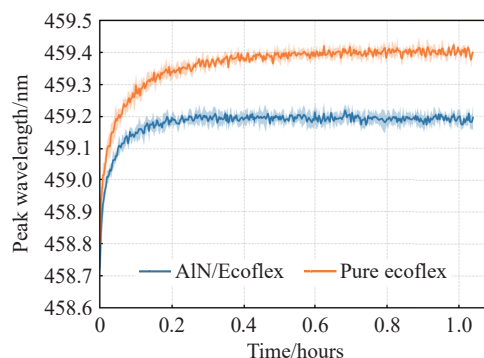


图 15 不同基底封装材料 LED 发光单元连续工作过程中的平均峰值波长变化。阴影区域表示 5 次测试结果的标准差

Fig. 15 Variation of average peak wavelength for LED units with different substrate packaging materials during continuous operation. The shaded area represents the standard deviation of five measurements.

4 结 论

本研究针对柔性可穿戴微型 LED 阵列器件中的高热流密度与柔性基体低导热性导致的热积累, 以及氮化铝导热填料表面活性基团导致的有机硅基体固化抑制的难题, 提出了一种基于铂金

催化剂原位调控 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料的光-热分层柔性可拉伸微型 LED 封装结构, 开展了基底层散热封装材料的热导率和拉伸特性、柔性可拉伸微型 LED 器件的热-电耦合特性研究。首先, 通过引入 2000ppm 铂金催化剂作为固化补偿剂, 利用其优先吸附机制中和了 AlN 表面的活性基团, 有效阻断了活性基团对硅氢加成反应的干扰, 实现了 20 wt% 填充量下 60 μm 粒径 AlN 在 Ecoflex 00-30 基体中的均匀分散与完全固化。同时, 研究了填料粒径与质量分数对材料导热性能的影响。测试结果表明, 在 20 wt% 的低填充量下, 相比纯 Ecoflex 00-30 基体, 该改性复合材料热导率由 0.164 W/(m·K) 提升至 0.222 W/(m·K),

提升了 35.4%。在 300% 拉伸应变及 50 次应力循环加载后, 材料仍保持良好的超弹性回弹, 未发生脆性断裂或界面脱粘。最后, 搭建了固态恒温标定系统, 获取了温敏 K 因子 (响应线性度 $R^2 > 0.999$), 电化学瞬态测温结果表明: 在 20 mA 恒定驱动下, 与纯 Ecoflex 00-30 封装相比, 采用 AlN/Ecoflex 00-30 复合材料基底层封装的器件稳态结温降低了 2.95 $^{\circ}\text{C}$ 。

本研究提出的光热分层柔性封装方案, 通过界面调控与结构设计, 在保持力学性能的同时优化了热耗散路径, 有效缓解了形变过程中的热积累问题, 从而保证了器件的发光稳定性。为柔性可穿戴 LED 器件的封装设计提供了新思路。

参考文献:

- [1] JIANG Q H, ANTWI-AFARI M F, FADAIE S, *et al.*. Self-powered wearable Internet of Things sensors for human-machine interfaces: a systematic literature review and science mapping analysis[J]. *Nano Energy*, 2024, 131: 110252.
- [2] 李继军, 聂晓梦, 李根生, 等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 695-710.
LI J J, NIE X M, LI G SH, *et al.*. Comparison and research progress of flat panel display technology[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 695-710. (in Chinese).
- [3] 冯思悦, 梁静秋, 梁中翥, 等. LED 微阵列投影系统设计[J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 88-96.
FENG S Y, LIANG J Q, LIANG ZH ZH, *et al.*. Design of projection system for a micro-LED array[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 88-96. (in Chinese).
- [4] 李香兰, 金霞, 吕金光, 等. Micro LED 车灯投影光学系统设计与优化[J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(1): 89-99.
LI X L, Jin X, LV J G, *et al.*. Design and optimization of Micro LED vehicle light projection optical system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 89-99. (in Chinese).
- [5] WANG CH X, YU Q, ZHANG X C, *et al.*. Flexible, implantable, and wearable LED devices based on the perspective of photomedicine: progress and potential medical applications[J]. *Materials Today*, 2025, 88: 752-782.
- [6] LEE J H, KIM M S, LEE S H, *et al.*. Flexible, surface-lighting MicroLED skin patch for multiple human skincare[J]. *Biomaterials*, 2025, 318: 123139.
- [7] LIU ZH Y, CAO H CH, TANG X, *et al.*. Advanced technologies in InGaN micro-LED fabrication to mitigate the sidewall effect[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 64.
- [8] 邱海, 黄振, 熊志华, 等. 氮化镓基 Micro-LED 侧壁对外量子效率的影响及侧壁处理技术综述[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(6): 1305-1317.
KUANG H, HUANG ZH, XIONG ZH H, *et al.*. A review of the effect of GaN-Based Micro-LED sidewall on external quantum efficiency and sidewall treatment techniques[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1305-1317. (in Chinese).
- [9] LIM M S, JEONG E G. Developments and future directions in stretchable display technology: materials, architectures, and applications[J]. *Micromachines*, 2025, 16(7): 772.
- [10] PAN K L, WANG J, LI Y, *et al.*. Sandwich-like flexible breathable strain sensor with tunable thermal regulation capability for human motion monitoring[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(8): 10633-10645.
- [11] 吴福培, 谢晓扬, 李昇平. 一种散热型发光二极管阵列结构光源设计方法 (英文)[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 670-684.
WU F P, XIE X Y, LI SH P. A thermal dissipation design method for LED array structure illumination[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 670-684. (in Chinese).
- [12] PARBROOK P J, CORBETT B, HAN J N, *et al.*. Micro-light emitting diode: from chips to applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(5): 2000133.

- [13] LI Z T, TAN J, LI J SH, *et al.*. A review on thermal management of light-emitting diodes: from package-level to system-level[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257: 124145.
- [14] WEI Y, LIAO Y M, LAI X J, *et al.*. Synergistically improving tracking resistance of addition-cure liquid silicone rubber with aminepropyltriethoxysilane-immobilized silica and platinum catalyst[J]. *Silicon*, 2024, 16(15): 5681-5689.
- [15] JIAO R, WANG R Q, XU Q, *et al.*. Highly stretchable strain-insensitive vertical serpentine conductors for flexible electronics[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(8): 13810-13818.
- [16] YE CH, STEWART B G, SITARAMAN S K. Stretchability of serpentine interconnect on polymer substrate for flexible electronics: a geometry and material sensitivity analysis[C]. *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, 2020: 1533-1541.
- [17] MATSUMOTO N, FUTABA D N, YAMADA T, *et al.*. Enhancing the thermal conductivity of CNT/AlN/silicone rubber composites by using CNTs directly grown on AlN to achieve a reduced filler filling ratio[J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(6): 528.
- [18] WANG J J, YI X S. Effects of interfacial thermal barrier resistance and particle shape and size on the thermal conductivity of AlN/PI composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(10-11): 1623-1628.
- [19] ASTM International. ASTM D5470-17 Standard test method for thermal transmission properties of thermally conductive electrical insulation materials[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [20] ASTM International. ASTM D412-16 Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers-tension[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016. (查阅网上资料, 不确定本条文献年份, 请确认).
- [21] JEDEC Solid State Technology Association. JESD51-1 Integrated circuit thermal measurement method-electrical test method (single semiconductor device)[S]. Arlington: JEDEC, 1995.
- [22] XI Y, SCHUBERT E F. Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(12): 2163-2165.

作者简介:



宁尉鸿(1998—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 2023 年于河北大学获得理学学士学位, 主要从事柔性可拉伸 LED 方面的研究。E-mail: ningweihong23@mails.ucas.ac.cn



郑凯丰(1993—), 男, 吉林长春人, 博士, 工程师, 2021 年在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事基于 Micro LED 的光学系统设计、辐射温度测量等方面的研究。E-mail: zhengkai Feng@ciomp.ac.cn



梁静秋(1962—), 女, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2003 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事 micro LED 与应用以及光谱技术与仪器方面的研究。E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn