

文章编号: 1000-7032(2024)10-1707-09

深紫外LED散热性能的改善研究

赵见国^{1*}, 杨佳楠^{1,2}, 徐 儒¹, 李佳芮², 王书昶^{2*}, 张惠国², 常建华¹

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

2. 常熟理工学院 电子信息工程学院, 江苏 苏州 215000)

摘要: 深紫外发光二极管(DUV-LED)可广泛应用于杀菌消毒、生化检测、医疗健康和紫外通信等诸多领域。目前商用 DUV-LED 的电光转换效率通常不足 5%, 从而使 LED 发热严重、结温升高, 进而导致 LED 出现峰值波长红移、光衰加剧、寿命缩短等一系列问题。在电光转换效率难以提高的背景下, 提升 DUV-LED 的散热性能以降低其工作结温是十分必要的。热阻是反映 LED 散热性能的直接参数, 其通常受导热面积、材料厚度、材料热导率等因素影响。本文系统研究了 DUV-LED 的芯片尺寸、焊接层填隙、导热硅脂和基板材质等因素对 LED 热阻的影响, 并对固晶区和焊接层的厚度进行了仿真研究。研究表明, 增大 LED 芯片尺寸、对焊接层进行填隙、基板与热沉间涂覆导热硅脂或者将 Al 基板更换为 Cu 基板等可以减小 LED 的热阻。针对商用 20 mil×20 mil 的 275 nm DUV-LED, 本研究将其热阻从 22.19 °C/W 降低至 12.83 °C/W, 在 25 °C 环境下, 电功率为 0.669 W 时芯片升温从 14.69 °C 降低至 8.49 °C。仿真结果表明, LED 工作结温随着固晶区或焊接层厚度的减小而线性降低, 其中固晶区厚度每增加 1 mm, 芯片升温将提高 44.82 °C, 因此可以通过适当减薄固晶区厚度来实现热阻的降低。

关键词: 深紫外发光二极管; 散热性能; 热阻; 结温

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240173

Improvement of Heat Dissipation Performance of Deep Ultraviolet LED

ZHAO Jianguo^{1*}, YANG Jianan^{1,2}, XU Ru¹, LI Jiarui², WANG Shuchang^{2*},ZHANG Huiguo², CHANG Jianhua¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou 215000, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhaojg@nuist.edu.cn; scw@csitg.edu.cn

Abstract: Deep ultraviolet light-emitting diodes (DUV-LEDs) can be widely used in many fields such as sterilization, biochemical detection, healthcare and UV communication. Currently, the wall-plug efficiency of commercial DUV-LEDs is usually less than 5%, which leads to serious heat generation and high junction temperature, which in turn leads to a series of problems such as peak wavelength redshift, increased light decay, and shortened lifetime of the LEDs. In the context of the difficulty of improving the wall-plug efficiency, it is necessary to improve heat dissipation performance of DUV-LEDs to reduce their operating junction temperature. Thermal resistance is a direct parameter to reflect the heat dissipation performance of LEDs, which is usually affected by factors such as thermal conductive area, material thickness, and material thermal conductivity. In this paper, the effects of chip size, solder gap filling, thermal grease application and PCB materials on the thermal resistance of DUV LEDs have been intensively studied, and the thickness of the solid crystal area and the solder layer have been simulated. It has been found that increasing the size of the LED chip, filling the gap in the solder layer, applying thermal grease and replacing the Al PCB with a Cu PCB can reduce the thermal resistance of the LED. For a commercial 20 mil×20 mil 275 nm DUV-LED, the thermal resistance was reduced from 22.19 °C/W to 12.83 °C/W, and the chip temperature rise was

收稿日期: 2024-07-18; 修订日期: 2024-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(62204121, 62005026)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62204121, 62005026)

reduced from 14.69 °C to 8.49 °C when operating at 25 °C and 0.662 W. The simulation results indicate that the LED working junction temperature decreases linearly with the reduction of the thickness of the solid crystal area or solder layer, in which the chip temperature increases by 44.82 °C for every 1 mm increase in the thickness of the solid crystal area, so the reduction of thermal resistance can be realized by appropriately thinning the thickness of the solid crystal area.

Key words: DUV-LED; heat dissipation performance; thermal resistance; junction temperature

1 引 言

基于Ⅲ族氮化物制备的发光二极管(LED)可以实现紫外-可见光-红外的全波段覆盖^[1-2]。其中可见光LED制造技术趋于成熟,有着高效、节能以及环保等诸多优势^[3];而深紫外发光二极管(DUV-LED)的效率较低,发热严重,与白光LED相比仍有很大提升空间。

外量子效率反映了向LED注入载流子后出射光子的效率^[4],是LED的一个重要参数。在发光边界为365 nm的GaN的相关材料中,发光波长处于365 nm以上的InGaN基近紫外LED的外量子效率可达46%~76%^[5],而发光波长处于365 nm以下的AlGaIn基紫外LED外量子效率一般低于20%^[6]。其中常用于杀菌消毒的DUV-LED(波长为265~280 nm)电光转换效率通常不足5%^[7],电功率中有95%以上转化为热功率,产热严重,工作结温较高^[8]。以本文研究的20 mil×20 mil的275 nm DUV-LED为例,其在室温环境下以额定功率0.6 W工作时结温可达70 °C。较高的工作结温会导致LED峰值波长红移、半波宽增大、辐射通量和电光转换效率降低^[9];芯片温度过高还会加剧光衰,影响LED的性能及寿命^[10-13],因此做好散热、降低结温是十分必要的。

LED的工作结温与自身热阻、工作热功率以及环境温度有关。对于以额定功率工作在固定环境温度下的LED,其结温受LED的热阻影响。在不改变LED工作条件时,可以通过减小热阻来降低芯片结温^[14]。LED的热量在芯片处产生,经过

固晶区、陶瓷支架、焊接层、基板等部分向空气环境传导。由于热阻具有加和性^[15],降低导热路径中任一部分的热阻值都能够使得总热阻下降。本文研究了DUV-LED的芯片尺寸对热阻的影响,并通过在焊接层间隙填充硅胶、在基板与热沉间涂覆导热硅脂或将Al基板更换为Cu基板等方式来降低DUV-LED的热阻,还通过有限元仿真软件仿真了LED的固晶区、焊接层的粘结材料厚度对结温的影响。通过仿真发现,随着粘结材料厚度减小,芯片升温 ΔT 随之近似线性下降,且固晶区材料厚度对结温的影响较焊接层更为明显。

2 实 验

2.1 芯片与封装材料

本实验使用发光波长为275 nm的DUV-LED,主要包括灯珠与基板两个部分,两者间通过焊接实现可靠粘结。灯珠采购自深圳市晟景光电科技有限公司,灯珠最外层是规格为3535的陶瓷支架,上方盖有平面石英玻璃,内部封装有韩国PW公司生产的275 nm LED倒装芯片,以金锡共晶封装工艺实现芯片固晶,金锡共晶焊料为 $\text{Au}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$ ^[16];本实验所用的DUV-LED芯片选用了常用的三种尺寸:10 mil×20 mil、20 mil×20 mil、30 mil×30 mil,将这三种尺寸的275 nm灯珠分别命名为L1020、L2020和L3030(实物图见补充文件图S1)。其中,L3030芯片实物图与DUV-LED结构示意图见图1。以中间尺寸的L2020为例,其光谱、光效曲线以及 I - V 曲线如图2所示。另外,

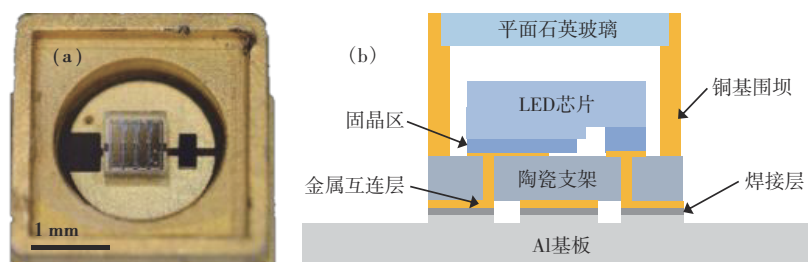


图1 本文中L3030芯片实物图(a)与DUV-LED结构示意图(b)

Fig.1 The physical image of L3030 chip(a) and schematic diagram of the DUV-LED(b) used in this paper

基板使用直径为 20 mm 的 Al、Cu 两种材质的基板,通过回流焊工艺实现支架与基板的焊接,焊料为 SnAgCu^[17];填隙的硅胶选用深圳市盟科技有限公司的 SCR-1018 B 硅胶。

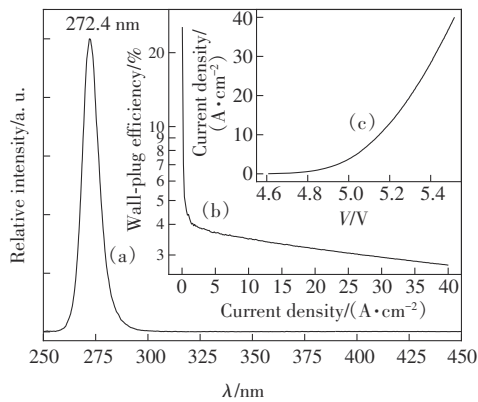


图2 L2020 的光谱(a)、光效曲线(b)以及 I-V 曲线(c)
Fig.2 The spectrum(a), wall-plug efficiency curve(b) and I-V curve(c) of L2020

2.2 实验设备

在实验过程中需要测试 LED 的电功率、光功率、 k 系数、热阻,会用到两台测试设备:(1)杭州远方光电有限公司的温控光电测量分析系统 ATA-500UV(实物图见补充文件图 S2),用来测试 DUV-LED 的热、光、电数据。测试可以得到 LED 电功率 P_e 与光功率 P_o ,热功率 P_h 则靠二者作差得到。(2)热阻结构分析系统为杭州远方光电有限公司的 TRA-300(实物图见补充文件图 S3),用来测试 LED 的 k 系数、热阻。通电时间为加热 LED 至工作结温所需时间,测试时间表示冷却 LED 至环境温度所需时间。在本研究的热阻测试中通电时间设置为 300 s,该通电时间下深 DUV-LED 芯片结温已趋于稳定;测试时间设置为 600 s,该测试时间下 LED 结温恢复至环境温度。

2.3 实验方案

LED 芯片升温 ΔT 可以表示为:

$$\Delta T = T_j - T_a = P_h R_{LED}, \tag{1}$$

其中 T_j 为芯片结温, T_a 为环境温度, P_h 为热功率, R_{LED} 为 LED 散热路径上的总热阻^[18]。从公式(1)可以看出,当 LED 以一固定功率工作在某一环境温度下时,芯片结温 T_a 与热阻 R_{LED} 之间呈正相关^[19],因此可以通过研究热阻的影响因素找到降低芯片工作结温的方式。

DUV-LED 导热路径上依次经过的分层主要有芯片、固晶区、陶瓷支架、焊接层、基板等^[20-21],各

分层热阻受自身热导率、底面积、厚度等因素影响。为探究热阻的影响因素,本研究制定实验方案并用 TRA-300 进行热阻测试(测试过程及参数设置见补充文件“2. 热阻测试”)。测试中将粘结了金属基板的灯珠放置在 TRA-300 的温控平台上,用夹具紧压以充分导热,温控平台对基板控温。本文制定试验方案如下:(1)分别为在 20 A/cm²、30 A/cm²、40 A/cm² 电流密度下对比粘结 Al 基板的 L2020 的积分结构函数,探究电流密度对热阻的影响;(2)在 40 A/cm² 电流密度下对比粘结 Al 基板的 L1020、L2020、L3030 的积分结构函数,探究芯片尺寸对热阻的影响;(3)在粘结 Al 基板的 L2020 中将绝缘的硅胶填充入焊接层的正极、负极、导热盘三者的间隙,或将导热硅脂涂在基板与温控平台之间,探究这两种增加两分层间接触面积的方式对热阻的影响;(4)对比粘结 Al 基板与 Cu 基板的 L2020 的积分结构函数,并将上一步实验中的基板更换为 Cu 进行测试,探究基板材质对热阻的影响。

实验过程中,三种尺寸 LED 的工作电流密度与对应电功率、热功率关系如表 1。对于 L1020、L2020、L3030,电流密度为 40 A/cm² 时对应电流值分别为 51.6 mA、103.2 mA、232.3 mA,与额定电流值接近,故本文中主要研究 40 A/cm² 电流密度下的散热性能。LED 热功率 P_h 需要通过电功率 P_e 与光功率 P_o 作差求得,TRA-300 无法测试 LED 的光功率 P_o ,这一数据使用 ATA-500UV 测得。

表 1 本文中三种尺寸 LED 的电流密度与对应功率
Tab. 1 The current density and corresponding power of the three sizes of LEDs used in this paper

芯片名称	电流密度/(A·cm ⁻²)	电功率/W	热功率/W
L1020	40	0.334	0.330
	20	0.318	0.314
L2020	30	0.492	0.486
	40	0.669	0.662
L3030	40	1.416	1.400

3 结果与讨论

3.1 芯片尺寸对热阻的影响

热传递的基本途径主要为:热传导、热对流、热辐射。在固体内部热量传递只能以传导的方式进行;在流体与散热器壁面之间的换热过程通常同时包含热对流与热传导;对高温固体或流体则还有热辐射^[22]。本文中芯片产生的热量以热传导的方式经基板直接传导至 TRA-300 的温控平台。

导热系数 λ 反映了单位时间内、单位面积上的热量传递量与温度梯度之比,单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,表示每秒通过 1 m^2 、物体厚度为 1 m 的材料,温度差为 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时所传递的热量;热阻 R 是材料抵抗热流通过的能力,即单位时间内单位面积上温差 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时所需施加的外力,单位为 K/W 或 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

在热传导中, R 与 λ 之间的关系如下:

$$R=L/(\lambda\cdot S),\tag{2}$$

其中, L 为材料的厚度, S 为材料的横截面积^[23-25],由公式(2)可知LED各部分的接触面积与厚度会影响散热性能。

不同尺寸的LED有着不同的工作功率与对应的电流密度,为在研究芯片尺寸与热阻的关系时排除电流密度或功率产生的影响,需先对比某一颗LED在不同电流密度下的热阻。图3展示了粘结了Al基板的L2020在不同电流密度下的热阻情况,可以看出电流密度对热阻数据无明显影响。

在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下对比粘结Al基板的L1020、L2020、L3030这三颗LED在 $40\text{ A}/\text{cm}^2$ 电流密度下的热阻,将测试得到的热阻数据绘制为如图4所示的结构函数。函数中的第一段反映了LED的芯片热阻。在图4可以看出,芯片热阻和总

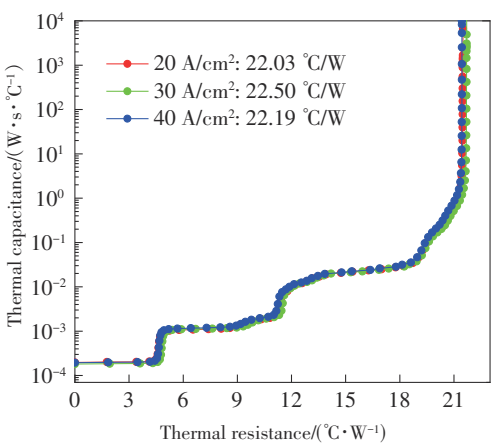


图3 L2020在不同电流密度下的积分结构函数
Fig. 3 Integral structure function of L2020 worked at different current densities

热阻与芯片尺寸负相关,随着芯片尺寸从 $10\text{ mil}\times 20\text{ mil}$ 增大到 $20\text{ mil}\times 20\text{ mil}$,芯片热阻从 $9.3\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 下降至 $4.9\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$,总热阻 R_{LED} 从 $28.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 下降至 $22.19\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$;随着芯片尺寸从 $20\text{ mil}\times 20\text{ mil}$ 增大到 $30\text{ mil}\times 30\text{ mil}$,芯片热阻从 $4.9\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 下降至 $3.0\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$,总热阻 R_{LED} 从 $22.19\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 下降至 $19.39\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 。L2020的热阻较L3030增加了 14.4% ,较L1020降低了 21.0% 。不同尺寸DUV-LED芯片在陶瓷支架上的面积占比不同,这会导致它们的陶瓷支架在散热能力上存在差异。

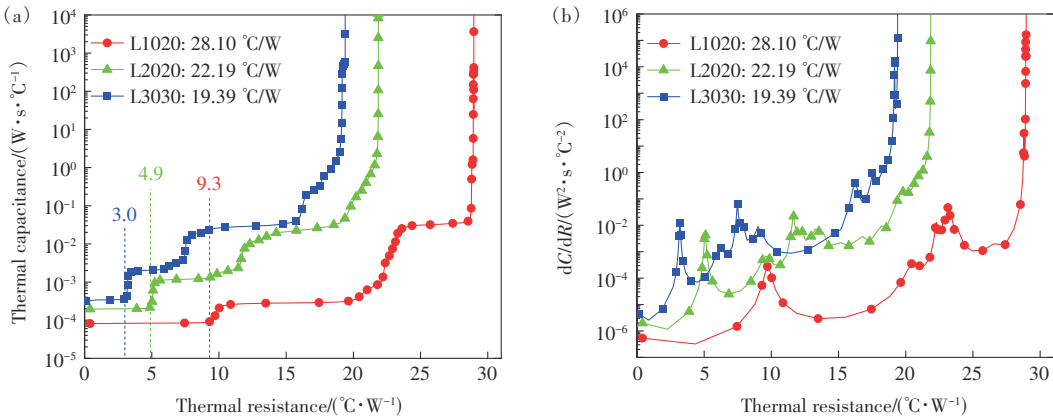


图4 $40\text{ A}/\text{cm}^2$ 电流密度下三种尺寸LED的积分结构函数(a)与微分结构函数(b)

Fig.4 The integral structure function(a) and differential structure function(b) of three sizes of LEDs worked at a current density of $40\text{ A}/\text{cm}^2$

通过热阻数据与表1中额定电流下的热功率数据可计算得到芯片升温 ΔT ,如表2所示。可以看出,虽然热阻随芯片尺寸增大而出现小幅降低,但由于额定电流下的热功率与芯片尺寸接近正比,最终L3030的升温明显高于L1020。因此,对大尺寸LED做好散热是十分必要的。

表2 三种尺寸LED的热阻与升温

Tab. 2 Thermal resistance and temperature rise of three sizes of LEDs

LED名称	基板材质	热功率/W	热阻/ $(^\circ\text{C}\cdot\text{W}^{-1})$	升温/ $^\circ\text{C}$
L1020	Al	0.330	28.10	9.3
L2020	Al	0.662	22.19	14.7
L3030	Al	1.400	19.39	27.1

3.2 降低热阻的方式

芯片产生的热量经过固晶区传导至陶瓷支架,再由锡焊接层传导至基板。焊接层实现陶瓷支架与基板之间正极、负极、导热盘的连接。为避免短路,正极与导热盘、导热盘与负极之间需要互相绝缘。当前在深紫外封装中都是直接使三者保持固定间距,若能将具有较高热导率的绝缘材质填充在三者之间,则可以促进陶瓷支架与基板之间的热传导。填充时难以直接将硅胶填充在间隙中,本文先将硅胶点在间隙的任一侧,再放入抽真空机中利用吸力使硅胶填充入间隙,这部分原本由陶瓷支架底部经空气散发的热量变为经硅胶传导至基板,且不会影响 LED 正常通电。

另外,由于基板与测试设备的接触界面不可能是理想光滑的,粗糙的界面会导致接触不充分,进而增加传导热阻,在两个接触面之间涂导热硅脂薄层能够使两者贴合更紧密,导热更加充分^[26-28]。

对于同一形状不同材质的基板,其热导率不同,热阻也不同^[29]。常用的基板有 Al、Cu 两种材质,其中 Al 的热导率为 237 W/(m·K),Cu 的热导率为 413 W/(m·K),由公式(2)可知对于相同形状的基板,采用 Cu 基板的热阻会比采用 Al 基板的低^[30]。

本文先研究粘结了 Al 基板的 L2020,对比不采取方案、焊接层填隙、基板与热沉间涂覆导热硅脂以及两种手段结合等方式对 LED 热阻的影响;再将 L2020 的 Al 基板更换为 Cu 基板并再次对比。实验得到积分结构函数如图 5 所示。从图 5 中可以看出积分结构函数前半段重合,这说明本节中所用降低热阻的方式不影响芯片、固晶区、陶瓷支架等前置路径的热阻值;从函数后半

段可以看出,焊接层填隙或涂覆导热硅脂这两种方式均能降低 LED 热阻,其中涂覆导热硅脂这一方式更为有效;将 Al 基板更换为 Cu 基板能够进一步降低热阻。

结合热阻与热功率计算出芯片升温 ΔT ,如表 3 所示。在焊接层填隙且基板与热沉间涂导热硅脂后,粘结了 Al 基板的 L2020 的热阻从原本 22.19 °C/W 下降至 20.45 °C/W,相应的升温 ΔT 从 14.69 °C 降低至 13.54 °C;将 Al 基板更换为 Cu 基板后热阻进一步下降至 12.83 °C/W,升温减少了 5.05 °C。可见在对散热性能有较高要求的应用场景中应选择 Cu 基板,且安装 LED 时可通过导热硅脂等材料将基板与热沉或其他夹具粘结在一起,以提升 LED 的散热效果。

表 3 应用不同改进方案后 L2020 的热阻与升温
Tab.3 Thermal resistance and temperature rise of L2020 after applying different improved schemes

基板材质	改善方式	热功率/W	热阻/(°C·W ⁻¹)	升温/°C
Al	—	0.662	22.19	14.69
Al	填隙	0.662	21.90	14.50
Al	填隙+硅脂	0.662	20.45	13.54
Cu	填隙+硅脂	0.662	12.83	8.49

4 粘结材料厚度仿真

由于实验中难以精确控制粘结材料厚度,本文使用有限元仿真研究了不同粘结材料厚度对芯片升温 ΔT 的影响。仿真需要建模并划分网格,以及设置计算域、环境参数、材料参数、监控点等,其中监控点设置在芯片中心位置^[31](具体的建模简化过程、网格划分及初始设置见补充文件“3. 有限元仿真”)。建模时需要设置 LED 各分层的尺寸与热导率,具体参数见表 4。

LED 的粘结层包括固晶区、焊接层,仿真 L2020 时环境温度 T_a 为 25 °C,输入热功率 P_h 为 0.662 W,该热功率对应电流密度为 40 A/cm²。由公式(2)可知分层热阻与厚度成正比,且由于 LED 封装体的各分层热阻间具有加和性,故芯片结温会随分层厚度线性变化。按照初始参数仿真的 L2020 温度空间分布如图 6 所示(三种尺寸 DUV-LED 在不同电流密度下的仿真温度分布见补充文件图 S7),其固晶区、焊接层厚度分别为 0.15 mm、0.5 mm,仿真得到 LED 结温 T_j 为 45.22 °C,芯片升温 ΔT 为 20.22 °C。

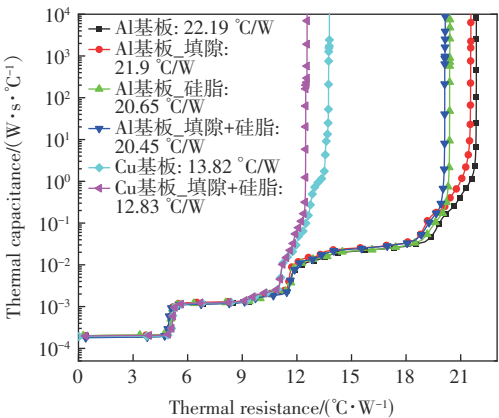


图 5 应用不同改进方案后 L2020 的积分结构函数
Fig.5 Integral structure function of L2020 after applying different improved schemes

表 4 厚度影响温度的仿真中 LED 建模参数

Tab. 4 LED modeling parameters in a simulation where thickness affects temperature

结构	材料	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	长宽高(mm×mm×mm)		
			L1020	L2020	L3030
玻璃盖板	石英	1.34		3.5×3.5×0.5	
芯片	AlGaIn	130	0.254×0.508×0.38	0.508×0.508×0.38	0.762×0.762×0.38
固晶区	Au _{0.8} Sn _{0.2}	57 ^[16]	0.254×0.508×0.15	0.508×0.508×0.15	0.762×0.762×0.15
陶瓷支架底部	AlN	285		3.5×3.5×0.8	
焊接层	SnAgCu	60 ^[17]		3.5×3.5×0.5	
基板	Al	237		半径 r=10 mm, 厚度 d=1.4 mm	
热沉	Al	237		半径 r=20 mm, 厚度 d=50 mm	

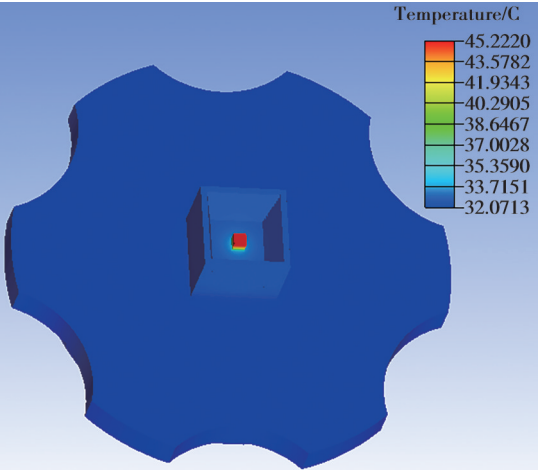


图 6 40 A/cm²电流密度下 L2020 的温度空间分布仿真

Fig.6 Simulation of the temperature spatial distribution of L2020 at a current density of 40 A/cm²

为研究固晶区与焊接层厚度对散热的影响,仿真中将二者尺寸作为变量。在研究固晶区厚度与对应结温时,将焊接层厚度设置为 0.5 mm,固晶区的建模厚度从 0.03 mm 增加到 0.27 mm,此时芯片升温从 14.83 ℃ 上升至 25.59 ℃,拟合斜率为 44.82。即当前条件下固晶区厚度每增加 1 mm,芯片升温将提高 44.82 ℃;在研究焊接层厚度与对应结温时,将固晶区厚度设置为 0.15 mm,焊接层的建模厚度从 0.3 mm 增加到 0.7 mm,此时芯片升温从 20.05 ℃ 上升至 20.39 ℃,拟合斜率为 0.86。即当前条件下焊接层厚度每增加 1 mm,芯片升温将提高 0.86 ℃。仿真结果如图 7 所示。

对比可知焊接层厚度对 LED 散热影响很小,而减小固晶区厚度可以大幅提升 LED 的散热能力。这是因为固晶区的导热横截面很小,分层热阻更大,是导热薄弱环节,所以其散热能力对厚度更为敏感。由公式(2)可知改变热导率与改变厚度的作用相似,故在 LED 工艺中可以探索热导率更高的固晶材料或在不影响结合强度的前提下减

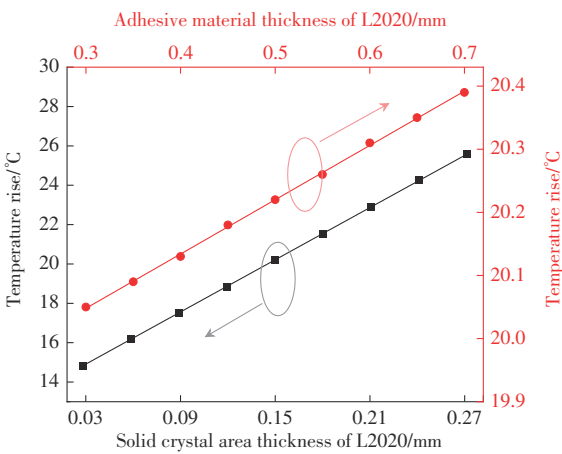


图 7 粘结材料厚度对芯片升温影响的仿真

Fig.7 Simulation of the effect of adhesive material thickness on chip temperature rise

小固晶区厚度,以提升 LED 的散热能力,降低芯片结温。

5 结 论

本研究旨在分析 DUV-LED 导热路径上各分层中采用不同结构对热阻的影响,得出以下结论:(1)同一封装工艺下的 DUV-LED 的热阻受芯片尺寸影响,增大芯片尺寸可以增加导热面积,降低热阻。在 L1020、L2020 与 L3030 这三种尺寸的 LED 中,L3030 虽然热阻最小,但其额定电流下的热功率远高于 L1020 与 L2020,所以其工作结温也明显更高。因此,对大尺寸 DUV-LED 做好散热是十分必要的。(2)焊接层填隙、基板与热沉间涂覆导热硅脂以及将 Al 基板更换为 Cu 基板均能提升 LED 不同分层之间的导热能力,降低热阻,对于本研究中采用了 20 mm 规格基板的 L2020,只使用 Al 基板时的热阻为 22.19 ℃/W,进行焊接层填隙、基板与热沉间涂覆导热硅脂并使用 Cu 基板时,热阻为 12.83 ℃/W。(3)从对

L2020 的仿真结果来看, 固晶区厚度每增加 1 mm, 芯片升温将提高 44.82 °C; 焊接层厚度每增加 1 mm, 芯片升温将提高 0.86 °C。在生产工艺中若能将固晶区厚度进一步做薄或找到更高热导率的固晶材料, 将能够有效降低 DUV-LED

在工作时的芯片结温。

本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240173>.

参 考 文 献:

- [1] ZHAO J G, ZHANG X, HE J Q, *et al.* High internal quantum efficiency of nonpolar *a*-plane AlGaIn-based multiple quantum wells grown on *r*-plane sapphire substrate [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1903-1906.
- [2] 林易展, 熊飞兵, 李森林, 等. 蓝宝石/石墨烯衬底上蓝光 LED 外延生长及光电性能 [J]. *发光学报*, 2024, 45(4): 603-612.
LIN Y Z, XIONG F B, LI S L, *et al.* Improvement of blue light LED epitaxy grown on sapphire/graphene substrate [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(4): 603-612. (in Chinese)
- [3] 赵见国, 索博研, 徐儒, 等. 荧光粉配比和激发波长对高品质白光 LED 的影响 [J]. *发光学报*, 2024, 45(1): 103-110.
ZHAO J G, SUO B Y, XU R, *et al.* Influence of phosphor ratio and emission wavelength on high quality white light LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(1): 103-110. (in Chinese)
- [4] 赵见国. 非极性 AlGaIn 基量子阱外延生长技术的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
ZHAO J G. *Study on the Epitaxial Growth Technology of Non-polar AlGaIn-based Multiple Quantum Well* [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [5] ZHAO J G, CHEN K, GONG M G, *et al.* Epitaxial growth and characteristics of nonpolar *a*-plane InGaIn films with blue-green-red emission and entire in content range [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2022, 39(4): 048101.
- [6] 林思棋. LED 光效及热特性分析研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
LIN S Q. *Study on Efficiencies and Thermal Characteristics of Light-emitting Diodes* [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018. (in Chinese)
- [7] 彭洋, 陈明祥, 罗小兵. 深紫外 LED 封装技术现状与展望 [J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 542-559.
PENG Y, CHEN M X, LUO X B. Status and perspectives of deep ultraviolet LED packaging technology [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(4): 542-559. (in Chinese)
- [8] ZHAO J G, PAN J Y, LIU B, *et al.* Improved optical properties of nonpolar AlGaIn-based multiple quantum wells emitting at 280 nm [J]. *IEEE Photonics J.*, 2021, 13(1): 1-7.
- [9] 余彬海, 王焱浩. 结温与热阻制约大功率 LED 发展 [J]. *发光学报*, 2005, 26(6): 761-766.
YU B H, WANG Y H. Junction temperature and thermal resistance restrict the developing of high-power LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2005, 26(6): 761-766. (in Chinese)
- [10] 樊嘉杰, 曹建武, 刘杰, 等. 近紫外 LED 封装器件的热稳定性及可靠性 [J]. *发光学报*, 2019, 40(7): 871-878.
FAN J J, CAO J W, LIU J, *et al.* Thermal stability and reliability analysis of ultraviolet light-emitting diode packages [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(7): 871-878. (in Chinese)
- [11] 廖燕君. AlGaIn 基深紫外发光二极管器件温度对其光电特性调制研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2021.
LIAO Y J. *Device Temperature on the Properties of AlGaIn Based Deep Ultraviolet Light-emitting Diode* [D]. Nanning: Guangxi University, 2021. (in Chinese)
- [12] 宫明峰, 孙雪娇, 雷程, 等. AlGaIn 基深紫外 LED 的可靠性研究及寿命预测 [J]. *光电技术*, 2024, 44(2): 106-115.
GONG M F, SUN X J, LEI C, *et al.* Reliability study and lifetime prediction of AlGaIn-based deep ultraviolet LED [J]. *Optoelectron. Technol.*, 2024, 44(2): 106-115. (in Chinese)
- [13] CHO J, PARK J H, KIM J K, *et al.* White light-emitting diodes: History, progress, and future [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2017, 11(2): 1600147.
- [14] 付强. 大功率 LED 结温与热阻测量研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.

- FU Q. *Research on Measurement of Junction Temperature and Thermal Resistance of High-power LED* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [15] 张海兵. 功率型LED的热测试和热仿真 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
ZHANG H B. *Thermal Testing and Simulation of High Power LED* [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009. (in Chinese)
- [16] 梁仁臻. AlInGa_N基紫外LED封装技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
LIANG R L. *Research on AlInGa_N Based Ultraviolet Light-emitting Diode Packaging Technology* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 程权炜. AlGa_N基紫外LED及其封装结构的光热性能研究 [D]. 广州: 广州大学, 2023.
CHENG Q W. *Photothermal Properties of AlGa_N-based UV LED and its Package Structure* [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023. (in Chinese)
- [18] 李善杰. 多应力条件下Ga_N功率器件的可靠性测试及其退化机理研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
LI S J. *Research on Reliability Test and Degradation Mechanism of Ga_N Power Device Under Multi-stress Conditions* [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020. (in Chinese)
- [19] 万垂铭, 曾照明, 肖国伟, 等. 高气密性的深紫外LED半无机封装技术 [J]. 发光学报, 2023, 44(10): 1842-1848.
WAN C M, ZENG Z M, XIAO G W, *et al.* Semi-inorganic packaging technology of DUV-LEDs with high-vapor tightness [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(10): 1842-1848. (in Chinese)
- [20] ZHAN D D, ZHOU J, QIAN J Y, *et al.* Investigation on conduction heat dissipation for thermal management in distributed multi-point electronic chips [J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2024, 2708: 012001.
- [21] 赵德志. UVB-LED的光热电理论与封装设计研究 [D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2021.
ZHAO D Z. *Study on Photothermoelectric Theory and Package Design of UVB-LED* [D]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Normal University, 2021. (in Chinese)
- [22] 王世龙, 熊传兵, 汤英文, 等. 共晶芯片数及芯片位置对陶瓷共晶封装LED发光性能的影响 [J]. 发光学报, 2020, 41(11): 1421-1430.
WANG S L, XIONG C B, TANG Y W, *et al.* Effect of number and location of eutectic chips on luminescent properties of ceramic eutectic packaged LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(11): 1421-1430. (in Chinese)
- [23] TANG Y, CHEN Q, GUAN W H, *et al.* Thermal analysis of an LED module with a novel assembled heat pipe heat sink [J]. *J. Cent. South Univ.*, 2017, 24(4): 921-928.
- [24] 苏孟玮. AlGa_N基深紫外发光二极管的可靠性研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2021.
SU M W. *Study on the Reliability of AlGa_N-based Deep Ultraviolet Light Emitting Diodes* [D]. Nanning: Guangxi University, 2021. (in Chinese)
- [25] 柳星星. 深紫外LED封装技术及其应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
LIU X X. *Research on Deep Ultraviolet Light-emitting Diode Packaging and Its Applications* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [26] RAYPAH M, DEVARAJAN M, MAHMUD S. Investigation on effects of solder paste voids on thermal and optical performance of white high-power surface-mounted device LEDs [J]. *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 2020, 32(2): 104-114.
- [27] JIANG C S, FAN J J, QIAN C, *et al.* Effects of voids on mechanical and thermal properties of the die attach solder layer used in high-power LED chip-scale packages [J]. *IEEE Trans. Comp. Packag. Manuf. Technol.*, 2018, 8(7): 1254-1262.
- [28] 刘梦然. AlGa_N基深紫外发光二极管的结构设计及性能提升研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
LIU M R. *Structural Design and Performance Improvement of AlGa_N-based Deep Ultraviolet Light-emitting Diodes* [D]. Ji'nan: Shandong University, 2023. (in Chinese)
- [29] 秦典成, 陈爱兵, 肖永龙. 嵌埋陶瓷散热基板对白LED性能的影响 [J]. 发光学报, 2019, 40(1): 97-105.
QIN D C, CHEN A B, XIAO Y L. Influence of ceramic-embedded heat dissipation substrate on performances of white LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(1): 97-105. (in Chinese)
- [30] RAYPAH M E, DHEEPAN M K, DEVARAJAN M, *et al.* Investigation on thermal characterization of low power SMD LED mounted on different substrate packages [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, 101: 19-29.
- [31] 吴妍. 基于热电制冷器的大功率LED散热仿真与实验研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023.

WU Y. *Thermal Management of High-power LEDs, Through Chip on Thermoelectric Cooler* [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2023. (in Chinese)



赵见国(1990-),男,山东莒县人,博士,副教授,2019年于东南大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体外延生长与相关器件制备的研究。

E-mail: zhaojg@nuist.edu.cn



王书昶(1985-),男,江苏建湖人,博士,副教授,2015年于东南大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料与器件的研究。

E-mail: scw@cslg.edu.cn