

文章编号: 1000-7032(2015)10-1212-08

AlGaInP-LED 发光阵列热场分析及散热设计

李 贺^{1,2}, 梁静秋¹, 梁中翥¹, 王维彪^{1*}, 田 超¹, 秦余欣¹, 吕金光¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 建立了 5×5 AlGaInP 材料 LED 微阵列的有限元热分析模型, 根据计算对模型进行了简化。结果表明, 简化模型与原始模型的温度分布规律基本一致, 计算得到的两种模型在工作 1.5 s 时的温度相对误差为 0.8%。使用简化模型模拟了含 10^4 个单元、尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ }\mu\text{m}$ 的芯片的温度场分布, 工作 1.5 s 时的芯片中心温度已达到 $360.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为解决其散热问题, 设计了两种散热器, 并对其结构进行了优化, 分析了翅片数量、翅片尺寸、粘结材料对芯片温度的影响。

关键词: 光学器件; 热学特性; 有限元分析; LED 微阵列; 散热器

中图分类号: TN383 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20153610.1212

Thermal Field Analysis and Heat Dissipation Design of AlGaInP-based LED Light Emitting Array

Li He^{1,2}, LIANG Jing-qiu¹, LIANG Zhong-zhu¹, WANG Wei-biao^{1*},
TIAN Chao¹, QIN Yu-xin¹, LYU Jin-guang¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, 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)

* Corresponding Author, E-mail: wangwb@126.com

Abstract: A finite element thermal analysis model of 5×5 AlGaInP-based LED microarray was established and simplified according to the calculation results. The results show that the simplified model and original model have the same temperature distribution, relative error of simplified model is 0.8% at 1.5 s. Using the simplified model, the temperature distribution of the chip with the size of $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ }\mu\text{m}$ and 10^4 units was calculated, and the center temperature of chip reached $360.6 \text{ }^\circ\text{C}$ at 1.5 s. In order to solve the problem of heat dissipation, two finned radiators were designed, and the impacts of radiator structure, adhesive material, and number of fins on the temperature of chip were simulated.

Key words: optical devices; thermal characteristic; finite element analysis; LED microarray; radiator

1 引 言

近年来, AlGaInP 材料高亮度 LED 吸引了人

们的研究兴趣, 它在显示、通信、照明等众多领域具有重要的应用价值^[1]。随着器件和电极结构设计完善以及半导体制造技术水平的提升,

收稿日期: 2015-07-04; 修订日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(61274122); 吉林省科技发展计划(20100351, 20120323); 长春市科技发展计划(2013269)资助项目

LED 器件的性能有了很大的改善。为了获得更高的光输出功率,通常采用增加单管 LED 尺寸或者利用多个单管 LED 组成阵列的方法。然而,这两种方法仍存在问题,例如因电流密度不均匀以及电流拥挤效应而导致的局部结温过高降低了器件的使用寿命和可靠性等。在很多系统中需要使用多个高功率 LED,在这种情况下,由单管 LED 组成阵列来提高光输出功率的方法将导致过大的封装尺寸及过高的成本^[2]。LED 微阵列芯片是利用 MOEMS 技术在一整块半导体外延片上直接制作出若干规则排列的微小发光单元,形成 LED 微阵列结构。相比于大尺寸 LED 和多管芯 LED 阵列,LED 微阵列芯片具有更均匀的电流密度和更小的封装尺寸^[3]。AlGaInP 材料 LED 的内量子效率可以接近 100%,但是由于芯片内各层材料对光的吸收、窗口层材料与空气之间折射率差异造成的全反射等原因,LED 的出光效率大大降低,大部分光能被材料吸收转化成了热能积聚在 LED 内部。若在大功率条件下工作,积累的热量将造成过高的结温进而造成光输出功率下降、光谱偏移、使用寿命降低等不利结果^[4-7]。虽然已经有许多关于单管 LED 热学特性的研究,但是针对 LED 微阵列芯片的热学性能分析还很少见到。

本文利用有限元分析软件建立了 AlGaInP 材料 LED 微阵列芯片的三维有限元模型,模拟并分析了 AlGaInP LED 微阵列芯片的温度分布情况。为 LED 微阵列芯片设计了不同的热沉结构,并模拟了不同结构对芯片温度分布的影响,所得结果有助于选择最适宜的热沉结构将芯片工作时的稳态温度控制在合理范围内。

2 模型的建立

LED 微阵列芯片工作时,内部温度分布规律满足热传导微分方程^[8]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 q_v 为热功率密度, T 为瞬态温度场, K_x 、 K_y 、 K_z 分别为 3 个方向的热传导系数, ρ 为材料密度, c 为材料比热。

为了使热传导微分方程具有唯一解,必须附加边界条件和初始条件。考虑周围流体介质与固

体之间换热的情况,此时流体介质的温度 T_f 和它们之间的换热系数 α 为已知,公式表示为:

$$-\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha(T - T_f) \Big|_r, \quad (2)$$

除此之外,任何时刻物体都有确定的温度分布,一般温度场的初始条件表示为:

$$T|_{t=0} = \varphi, \quad (3)$$

式中 φ 为已知函数,代表物体初始时刻的温度分布。

由热传导微分方程可知,当边界条件及热功率密度为已知时,温度场分布与材料的比热、热传导系数和密度有关。

由于器件阵列中像元素数目多,结构比较复杂,在有限元划分、计算时间、计算机配置上都受到较大的限制,完全按照实物结构建模计算,其计算量较大,本文选取尺寸较小的 5×5 阵列进行分析计算。在此基础上,对计算模型简化,在简化模型的基础上对大像素尺寸器件进行建模计算。

2.1 原始模型

5×5 AlGaInP 材料 LED 微阵列结构如图 1 所示,阵列单元结构中含有各层结构。

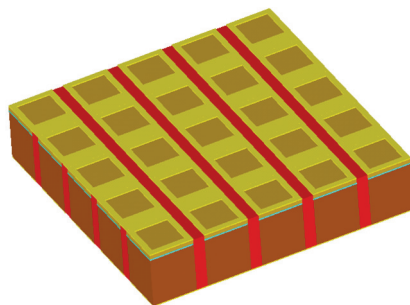


图 1 5×5 像素 AlGaInP 材料 LED 微阵列芯片

Fig. 1 5×5 light-emitting unit of AlGaInP-based LED microarray

阵列芯片厚度为 $100 \mu\text{m}$,阵列单元周期 $100 \mu\text{m}$,发光单元尺寸为 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$,单元之间通过宽度为 $20 \mu\text{m}$ 的 PI(聚酰亚胺)隔离。同一行发光单元共用同一阳极,同一列发光单元共用同一阴极,阳极电极形状采用回型,以保证足够的出光面积和电流的均匀性^[9-11]。阵列单元结构如图 2 所示。

考虑一个厚度为 L 、表面积为 A 、热导率为 K 的平壁,导热热阻为^[8]:

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{KA}, \quad (4)$$

对于图 2 所示结构的发光单元, 体积 $V = 10^{-12} \text{ m}^3$, 考虑各层不同材料, 将单元结构的热阻关系划分横向等效热阻网络, 它可以看作是 GaP 层、AlGaInP 层和 GaAs 层并联之后与 PI 层串联再与电极层并联, 如图 3 所示。

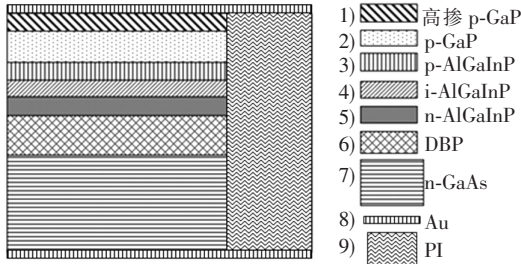


图 2 发光单元剖面示意图

Fig. 2 Cross-section of light-emitting unit

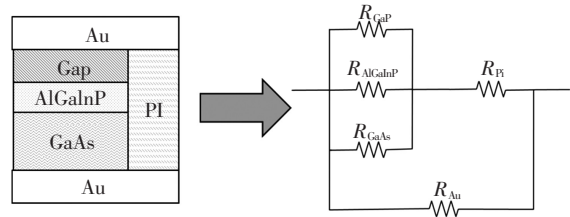


图 3 发光单元等效热阻网络

Fig. 3 Thermal resistance network of light-emitting unit

各层热阻计算和热场分布计算需要的参数如表 1 所示^[3,12]。

根据公式(4), 计算得到各层的热阻如表 2 所示。

根据表 2, 单元总热阻为:

表 1 模拟中所用材料参数

Table 1 Materials parameters used in simulation

	$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$K/(\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$H/\mu\text{m}$
Au	132.3	301	19 320	2
GaP	434.4	77	4 130	7.2
AlGaInP	337	8.2	4 200	1.2/0.8/0.8
GaAs	327	46	5 318	90
PI	1 100	0.3	2 700	100
AlN	460	290	3 260	100
Cu	385	385	8 960	

表 2 各层材料热阻

Table 2 Heat resistance of different material

材料	热阻/ $(\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$
Au	2.09×10^3
GaP	1.8×10^3
AlGaInP	4.36×10^4
GaAs	2.42×10^2
PI	8.3×10^3

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{R_{\text{GaP}}} + \frac{1}{R_{\text{AlGaInP}}} + \frac{1}{R_{\text{GaAs}}}} + R_{\text{PI}}} + \frac{1}{R_{\text{Au}}} = 10.2 \times 10^3 \text{ K/W.} \quad (5)$$

2.2 简化模型

简化模型是将 5×5 像素阵列看作由一块同样大小的同一材料组成的平板。为了进一步简化计算, 考虑到芯片厚度较小, 垂直方向的温度

分布可以忽略, 主要研究温度沿芯片表面的分布。对于大尺寸芯片, 单元数量较多时, 单元结构尺寸远远小于芯片的整体尺寸, 单元结构对芯片整体的温度分布影响很小, 可以利用计算得到的热学参数, 将原始的芯片模型简化为一块厚度为 $100 \mu\text{m}$ 且没有内部结构由一种材料构成的平板, 将使用式(6)~(9)计算得到的平均热学参数作为材料的热学参数。单元的平均热传导系数为:

$$K_{\text{ave}} = \frac{L}{R_{\text{cond}A}} = 5.95 \text{ W/m}, \quad (6)$$

单元质量为:

$$m = \sum_i V_i \rho_i = 4.62 \times 10^{-9} \text{ kg}, \quad (7)$$

式中, i 代表材料编号, V_i 和 ρ_i 分别是材料的体积和密度。单元密度为:

$$\rho = \frac{m}{V} = 4.62 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, \quad (8)$$

平均比热容为:

$$c = \frac{\sum_i c_i m_i}{m} = 480.2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}). \quad (9)$$

为了研究在两种模型下阵列温度分布的差别并进一步验证简化模型的可行性,由公式(1)及其边界条件、各相关参数分别计算了带有单元结构的原始模型和没有单元结构的简化模型的热场分布,对两种模型的计算结果进行了对比。计算中忽略芯片的热辐射,芯片通过外表面与空气自然对流,设定对流系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,空气温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,并假设对流系数不随温度变化^[13-14]。在电压为 2 V 、电流为 0.6 mA 的工作状态下,芯片功率为 1.2 mW 。通常在 LED 工作时,有 20% 的能量转化为光能,其余能量转化为热能^[6],因此芯片的热功率约为 1 mW 。热功率密度的计算公式为:

$$H = \frac{P}{V}, \quad (7)$$

式中, H 为热功率密度, P 为热功率, V 为单元体积。根据计算,将热源的功率密度设定为 $1 \times 10^9 \text{ W}/\text{m}^3$ 。

设定 5×5 阵列中有 3×3 个单元在图 4 所示的 0.6 mA 、 50 Hz 的脉冲电流驱动下处在工作状态,分别瞬态分析了原始模型和简化模型在工作 1.5 s 内的温度分布变化情况。

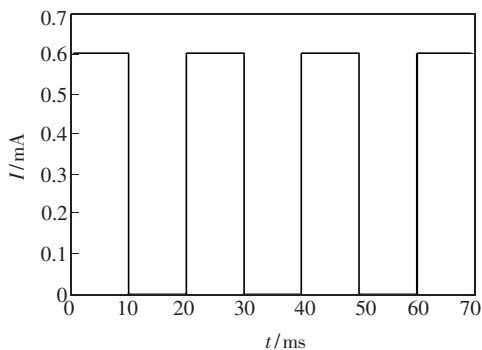


图 4 脉冲电流波形示意图
Fig. 4 Current pulse shape

图 5 给出了两种模型中心单元温度随时间的变化曲线。从图中可以看出,两个模型中的温度随时间变化的规律基本一致, 1.5 s 时原始模型温度为 $131.9 \text{ }^\circ\text{C}$,简化模型为 $130.8 \text{ }^\circ\text{C}$,相对误差仅有 0.8% 。

图 6 为中间一行单元的温度分布情况。两条温度分布曲线保持着相同的变化规律,两个模型

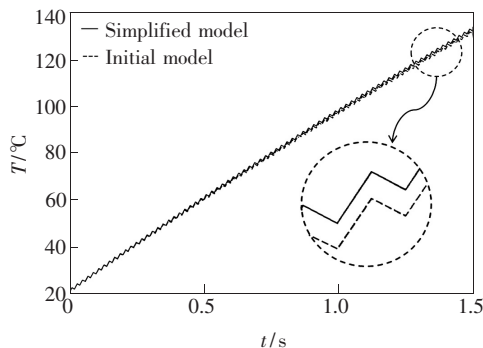


图 5 阵列中心温度随时间的变化曲线
Fig. 5 Temperature-time curve of central position of the microarray

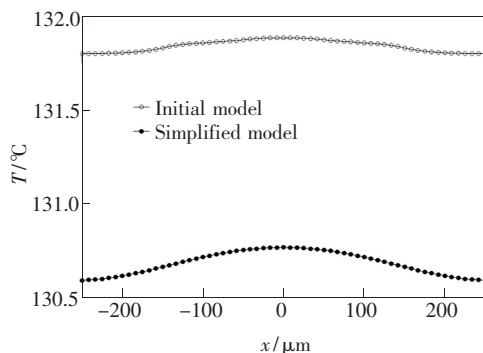


图 6 中间一行单元的温度分布曲线
Fig. 6 Temperature distribution along middle row

的温度差在各个位置始终保持在 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

图 7 为两种模型的温度分布云图,从中可以看出,简化后的模型与原模型的温度分布基本一致,两种模型的最高温度和最低温度差均为 $0.28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

通常 LED 微阵列器件正常工作时的温度在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,在芯片尺寸更大以及温度较低的情况下,两个模型温度分布的差别将会更小。

以上分析表明,简化模型和 5×5 像素大小的原始模型有几乎一致的温度分布规律。用简化模型代替原始模型计算大尺寸、高像素芯片的温度分布是可行的,即用简化模型建立方法可以建立大尺寸高像素阵列热学模型^[15]。大尺寸高像素阵列芯片可以看作是由若干 5×5 阵列拼接组成,每个 5×5 像素区域都可以用相同大小的一块平板(简化模型)替代,相应区域具有相同的热学特性,整体温度分布规律也应该与原始模型方法的计算结果保持相同。这样就解决了大像素条件下网格划分困难的问题,有效降低了对计算机配置的要求。

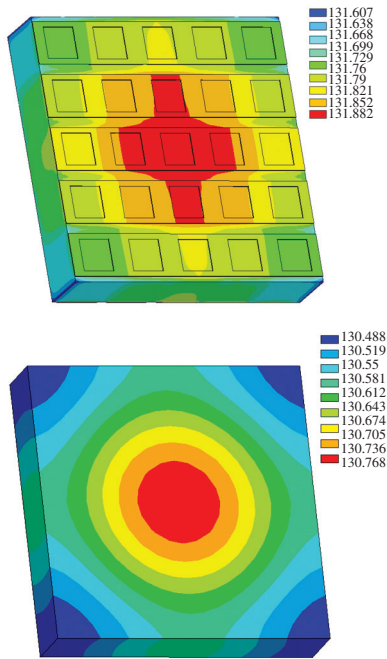


图 7 1.5 s 时,原始模型(a)和简化模型(b)的温度分布云图。

Fig. 7 Temperature distribution of initial model (a) and simplified model(b) at 1.5 s

3 大尺寸阵列的温度分布

根据上面的研究计算,我们建立了含 10^4 个发光单元、尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ }\mu\text{m}$ 的微阵列芯片的简化模型,分析了芯片的瞬态温度场分布。所有单元均在图 4 所示的脉冲电流驱动下工作,芯片总功率为 10 W,其他边界条件与以上模拟过程保持一致。

图 8、图 9 分别给出了芯片中心位置温度随时间的变化关系及阵列工作 1.5 s 时的芯片温度分布云图。可以看出,由于芯片功率较大,芯片温

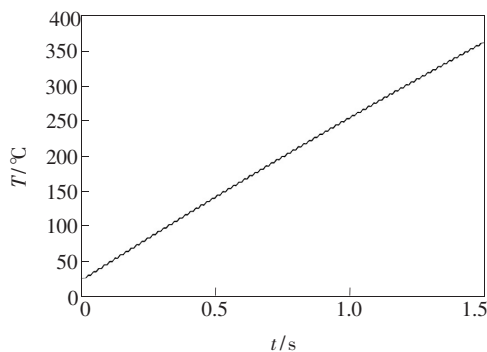


图 8 阵列中心温度随时间的变化曲线

Fig. 8 Temperature-time curve of central position of the microarray

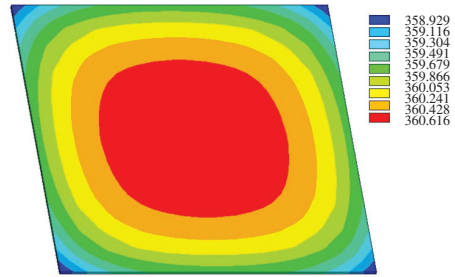


图 9 1.5 s 时的芯片温度分布云图

Fig. 9 Temperature distribution of chip at 1.5 s

度上升速度很快,1.5 s 时的芯片中心温度已经达到了 $360.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

LED 的结温升高将导致光输出功率下降,光功率与结温之间的关系可以表示为:

$$P(T_2) = P(T_1) e^{-K(T_2 - T_1)}, \quad (8)$$

式中, $P(T_1)$ 、 $P(T_2)$ 分别为 T_1 和 T_2 时的光功率。 K 为温度系数,其值与发光材料有关,对于 AlGaInP 来说, K 值约为 0.01 ^[16]。图 10 给出了 AlGaInP 材料 LED 的光输出功率随结温的相对变化曲线(与结温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的光功率相比)。

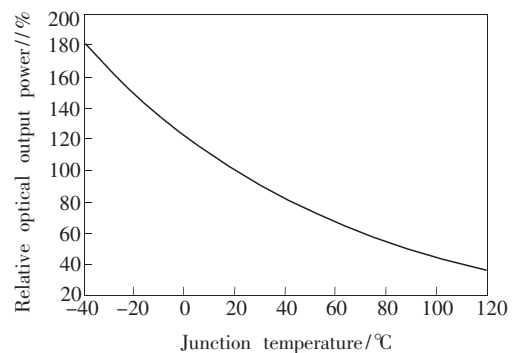


图 10 光输出功率随结温的相对变化曲线

Fig. 10 Change curve of optical output power with junction temperature

通过以上模拟分析可知,为保证芯片能够长时间稳定工作,必须给微阵列芯片增加散热结构^[17]。

4 散热器结构设计

为解决芯片的散热问题,本文设计了 a、b 两种翅片型散热结构,散热器材料为 Cu,散热方式采用自然对流。我们模拟了功率为 10 W、含 10^4 个发光单元、尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ }\mu\text{m}$ 的微阵列芯片在与不同结构的散热器相连接时的温度场分布。芯片底部有一层 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 厚的 AlN 绝

缘层,并通过 100 μm 厚的纳米银焊膏与散热器基底连接。散热器 a、b 及芯片结构如图 11 所示。其中 a 型散热器横截面尺寸为 30 mm \times 30 mm,基底厚度为 5 mm,翅片厚度为 1 mm;b 型散热器横截面半径为 30 mm,基底厚度为 5 mm,翅片厚度为 1 mm。工作时,芯片表面与散热器上表面为绝热,通过翅片与空气自然对流散热,对流系数设定为 10 W/(m² · K),室温设定为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

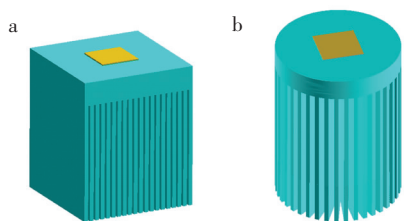


图 11 散热器结构示意图

Fig. 11 Structure of the radiators

为得到良好的散热效果,本文对散热器结构进行了优化。通过增加翅片尺寸、数量等方法来增加散热面积,以增加与空气的换热量。图 12 给出了稳态时芯片上最高温度随散热器翅片数量的变化情况。从图中可以看出,随着翅片数的增多,

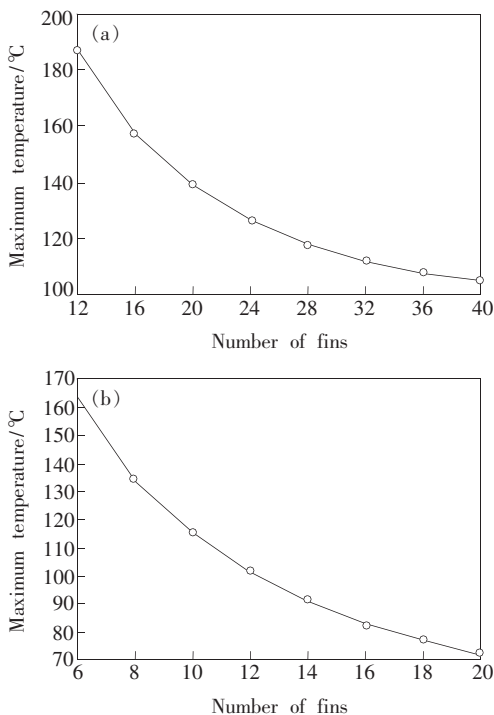


图 12 芯片最高温度随翅片数的变化曲线。(a) a 型散热器;(b) b 型散热器。

Fig. 12 Curves of maximum temperature of chip accompanied with the number of fins. (a) Type a radiator. (b) Type b radiator.

散热面积增大,芯片温度显著下降,但下降趋势逐渐变缓。继续通过增加翅片数量来增加芯片散热能力的效果将不明显,而且翅片数过多将导致翅片间距过小,不利于空气流通,使散热能力下降。

图 13 给出了稳态时芯片最高温度随散热器高度的变化情况。从图中可以看出,芯片温度随散热器高度的增加而显著下降,但下降趋势逐渐减缓。

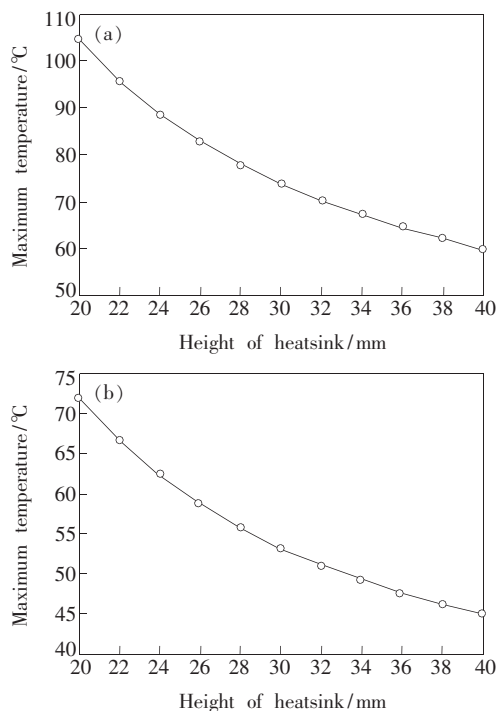


图 13 芯片最高温度随散热器高度的变化曲线。(a) a 型散热器;(b) b 型散热器。

Fig. 13 Curves of maximum temperature of chip accompanied with height of radiator. (a) Type a radiator. (b) Type b radiator.

从以上的模拟结果可以看出,增加散热器散热面积需同时运用以上两种方法,综合考虑散热器的尺寸、重量以及稳态时芯片的温度分布。最终选择结构参数为 a 型散热器的高为 30 mm,翅片数为 20 片;b 型散热器的高为 40 mm,翅片数为 40 片。

芯片与散热器之间的粘结材料对芯片的散热性能有很大影响。设定芯片与结构尺寸为 30 mm \times 30 mm \times 30 mm、翅片厚度为 1 mm、翅片数量为 20 片的 a 型散热器连接,对比了粘结材料分别为导电胶、导电银胶、铅锡焊料、纳米银焊膏(热导率分别为 0.1, 20, 60, 240 W/(K · m))时对芯片温度的影响。从图 14 可以看出,当粘结材

料为导热系数较小的导电胶时,芯片温度要明显高于选择其他粘结材料的情况。这说明当粘结材料的导热系数过小时,将成为限制芯片散热的一个重要因素。当粘结材料的导热系数大于 $20 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m})$ 时,选择导热系数更高的粘结材料对于芯

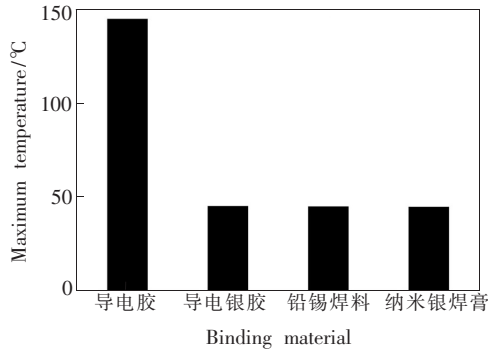


图 14 使用不同粘结材料时,芯片最高温度的变化。

Fig. 14 Variation of maximum temperature of chip accompanied with binding material

片散热能力的提升并没有显著作用。

5 结 论

对 AlGaInP 材料 LED 微阵列进行有限元方法计算。首先建立 5×5 像素微阵列的有限元原始模型,计算了其热学参数和热场分布。采用与 5×5 像素大小相同的同一材料的平板代替 5×5 微阵列对模型进行了简化。计算得到发光单元的热阻为 $10.2 \times 10^3 \text{ K}/\text{W}$ 、平均热传导系数为 $5.95 \text{ W}/\text{m}$ 、平均比热容为 $480.2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,简化后的模型与原始模型温度分布基本一致,相对误差为 0.8% ,两种模型中最高温度和最低温度差均为 $0.28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。应用简化模型计算了大尺寸芯片的温度分布并设计了两种翅片型散热器,对散热器结构进行优化,计算分析了翅片数量、翅片尺寸、粘结材料对芯片温度的影响,最终选择出两种最适宜的结构。

参 考 文 献:

- [1] Liang J Q. Research advances in micro-LED display devices [J]. *OME Information* (光机电信息), 2010, 27(12):21-27 (in Chinese).
- [2] Li K H, Cheung Y F. Optical and thermal analyses of thin-film hexagonal micro-mesh light-emitting diodes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2013, 25(4):374-377.
- [3] Kim M S, Lee H K, Yu J S. Device characteristics and thermal analysis of AlGaInP-based red monolithic light-emitting diode arrays [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2013, 28(2):025005-1-8.
- [4] Cho J Y, Byeon K J. Improved AlGaInP vertical emitting light-emitting diodes using direct printing [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(9):1573-1575.
- [5] Pan J W, Tsai P J. Light extraction efficiency analysis of GaN-based light-emitting diodes with nanopatterned sapphire substrates [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(7):1358-1367.
- [6] Dai Q, Shan Q F, Wang J, et al. Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(13):133507-1-3.
- [7] Guo L X, Zuo D W, Sun Y L, et al. Heat dissipation technology of LED and its research process [J]. *China Illumin. Eng. J.* (照明工程学报), 2013, 24(4):64-70 (in Chinese).
- [8] Shabany Y. *Heat Transfer: Thermal Management of Electronics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2013:135-158 (in Chinese).
- [9] Liang J Q, Li J, Wang W B, et al. Design and fabrication of AlGaInP LED array [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2006, 21(6):604-608 (in Chinese).
- [10] Tian C, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Design and experiment AlGaInP micro-LED arrays with double strip electrode [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2013, 34(11):840-845 (in Chinese).
- [11] Bao X Z, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Effect of AlGaInP-LED arrays units side-reflection on light output efficiency [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.* (液晶与显示), 2013, 28(5):726-731 (in Chinese).
- [12] Dai W F. Transient thermal analysis of high power LED package [J]. *Semicond. Optoelectron.* (半导体光电), 2008, 29(3):324-328 (in Chinese).
- [13] Hu L M, Li Z J, Qin L, et al. Thermal analysis of high-power, high-duty-cycle laser diode array [J]. *Acta Optica Sinica*

(光学学报), 2010, 30(4):1055-1060 (in Chinese).

- [14] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, *et al.* Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser [J]. *Chin. J. Laser.* (中国激光), 2012, 39(10):1002003-1-6 (in Chinese).
- [15] Zhang J F, Wang C L, Wu Y P, *et al.* Application of ANSYS in heat-analysis [J]. *Energy Metallurg. Ind.*, 2004, 23(5):9-12.
- [16] Zhou C Y. Study on LabVIEW-based Measurement of Junction Temperature of LED and Its Photoelectric Properties [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011:61-62 (in Chinese).
- [17] Liu X. Reliability Research of LED Road Lamp Design Technology [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012: 36-66 (in Chinese).



李贺(1990 -), 男, 辽宁锦州人, 硕士研究生, 2013 年于东北大学获得学士学位, 主要从事 LED 微阵列器件的设计与制备的研究。
E-mail: 294811131@qq.com



王维彪(1962 -), 男, 江苏扬州人, 研究员, 博士生导师, 1999 年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位, 主要从事光电信息功能材料、器件及应用方面的研究。
E-mail: wangwbt@126.com



欢迎订阅 2016 年《人工晶体学报》 ——EI 核心期刊(物理学类, 化学类, 材料科学类)

《人工晶体学报》(ISSN 1000-985X, CN11-2637/07) 是由中材人工晶体研究院有限公司主办, 是国内唯一一本专门刊登人工晶体材料这一高新技术领域研究热点的国际性刊物。

《人工晶体学报》以论文和简报等形式报道我国在晶体材料: 半导体材料、超导材料、红外材料、发光材料、新能源材料(太阳能电池材料、锂离子电池材料、固体氧化物燃料电池材料)、纳米材料、超硬材料和和高技术陶瓷在理论研究、生长技术、性能表征、加工以及生长设备等方面的最新科研成果, 已成为世界了解我国人工晶体材料研究领域的重要窗口。《人工晶体学报》为中文核心期刊、中文科技核心期刊, 美国“工程索引”(EI) 核心期刊。全文电子版被“中国知网”、EI、美国《化学文摘》(CA) 等收录。

《人工晶体学报》现为月刊出版, 大十六开, 每期约 300 页, 2016 年每册定价 100 元, 全年定价 1200 元, 订阅本刊请直接与编辑部联系。

欢迎广大作者和读者踊跃投稿和订阅!

地 址: 北京市朝阳区东坝红松园 1 号《人工晶体学报》编辑部

邮 编: 100018

电 话: 010-65491290

E-mail: jtxbbjb@126.com

网 址: www.jtxb.cn