

微型倒装 AlGaInP 发光二极管阵列器件的光电性能

班章^{1,2**}, 梁静秋^{*}, 吕金光¹, 李阳^{1,2}

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 为进一步提高红光微型发光二极管(LED)阵列器件的能量利用效率,对倒装 AlGaInP LED 阵列器件的光电性能进行研究。首先,测试对比了垂直型和倒装型 AlGaInP LED 两种芯片结构的出光性能,表明倒装型 LED 具有更高的出光功率。其次,建立了倒装型 LED 阵列出光功率模型,计算得到了出光功率与环境温度、基底热阻的关系:随基底热阻增大、环境温度升高,AlGaInP LED 阵列器件的出光功率逐渐降低,出光饱和处对应的注入电流前移,光电性能逐渐下降。然后,采用转印法制备了 6×6 倒装 AlGaInP LED 阵列,测试结果表明,理论与实测结果较为一致。最后,利用有限元软件计算分析了 Cu 和聚二甲硅氧烷(PDMS)这两种常见基底的热阻随环境、结构变化的数值关系。结果显示,Cu 基底的散热较为均匀,优化基底结构或增加空气对流速率,对 Cu 基底热阻值的改变相对较小;PDMS 材料的散热均匀性相对较差,通过优化基底结构、增大空气对流速率可以有效降低基底热阻,改善微型 LED 阵列器件的光电性能。

关键词 光学器件; 微型; 倒装; 红光; AlGaInP 发光二极管阵列

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0923001

Photoelectric Characteristics of Micro Flip-Chip AlGaInP Light Emitting Diode Array

Ban Zhang^{1,2**}, Liang Jingqiu^{1*}, Lü Jinguang¹, Li Yang^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

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

Abstract In order to improve the energy utilization of red LED array devices, we study the photoelectric characteristics of flip-chip AlGaInP-based light emitting diode (LED) array device. Firstly, the light output power characteristics of AlGaInP-based LED with vertical type and flip-chip type structures are tested and compared with each other. The results show that the light output power of flip-chip LED is higher than that of the vertical LED. Then, a model to calculate the output power of flip-chip LED array is proposed, which is used to calculate the relationship between light output power, ambient temperature and base thermal resistance. The results reveal that with the increase of the base thermal resistance and ambient temperature, the output power of the LED array device decreases, the injection current at saturation shifts forward, and the photoelectric performance of LED array decreases. The 6×6 flip-chip AlGaInP-based LED array device is prepared using the transfer method. The testing results are consistent with the theoretical predictions. Finally, the numerical relationships between the thermal resistance of Cu and polydimethylsiloxane (PDMS) with different basement structures and ambient conditions are analyzed by finite element method. The results show that the heat dissipation capacity of Cu is relatively uniform and its thermal resistance is not sensitive to the structure and the air convection rate. However, for PDMS materials, the thermal resistance is relatively large and can be effectively reduced by optimizing its structure and increasing the air convection rate, thereby improve the photoelectric performance of the micro LED array device.

Key words optical devices; micro; flip-chip; red light; AlGaInP light emitting diode array

OCIS codes 230.3670; 230.3120; 130.0250; 230.3990

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(61274122)、吉林省科技发展规划(20160204007GX, 20180201024GX)、广东省科技发展规划(2016B010111003)、中国科学院创新促进会基金(2014193, 2018254)、长春市科技计划(2013269)

* E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn; ** E-mail: banzhang0711@163.com

1 引 言

作为第四代照明能源的发光二极管(LED)现已成为交通显示、医疗照明、投影、军事通信等领域的核心发光器件^[1-4]。随着微投影、微显示等概念的提出,科研人员的关注点逐渐由大尺寸器件向微型器件转移^[5-7]。目前,微型LED已被广泛应于可见光通信、智能照明、微光机电系统等领域^[8-10]。其中,红光LED芯片一般由AlGaInP四元系材料制备而成。为满足外延层生长晶格的匹配,通常选用GaAs作为外延衬底材料^[11-12]。GaAs为具有导电特性的半导体材料,因此可将AlGaInP红光LED芯片制作成双侧电极结构器件。由于GaAs衬底为非透明晶体,LED量子阱层内部产生的光只能通过正表面出射,这限制了LED芯片的驱动方式。此外,GaAs衬底会对出射光有一定的吸收作用^[13]。作为芯片的工作组分,GaAs衬底会增大器件的寄生电阻^[14]。蓝宝石为绝缘透明晶体,可被用作制备蓝光和绿光LED芯片的外延生长衬底。以蓝宝石为衬底的LED芯片具有两侧出光的特点,因而可将芯片制备成倒装结构^[15],而这种结构可进一步减小像素单元在阵列器件中的间距,提高像素分辨率。目前,采用双侧电极制备的微型红光LED阵列电光转换效率较低,器件的工作寿命难以得到保证^[13]。对红光LED芯片进行衬底转移,不但可以减小寄生电阻,提高器件能量的利用效率,还可以用于制备微型倒装结构,与蓝绿倒装芯片形成良好的匹配,使微型全色LED阵列的制作工艺得以简化,从而提高器件的良品率,降低器件的制作成本。

为提高红光LED芯片能量的利用效率,本文针

对倒装AlGaInP LED芯片的光电性能进行了研究。采用转印法制备微型倒装AlGaInP LED阵列器件,并对器件的出光性能进行测试。建立微型LED阵列芯片出光功率曲线的计算模型,并与测试结果进行了对比。采用有限元计算分析了聚二甲基硅氧烷(PDMS)和Cu这两种常见基底材料的热阻 R_{hs} 随环境及结构变化的关系。

2 AlGaInP LED 芯片的出光功率

垂直型和倒装型AlGaInP LED芯片的结构如图1(a)、(b)所示,其中倒装型AlGaInP LED芯片为垂直型AlGaInP LED经过一次衬底转移制备得到。图1(c)、(d)分别为垂直型和倒装型结构AlGaInP LED芯片的正表面,两种芯片的尺寸均为 $300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$ 。在环境温度分别为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,两种芯片的出光功率曲线如图1(e)所示:随着注入电流增大,两种结构芯片均出现光饱和效应;随环境温度升高,光饱和处对应的注入电流前移;在相同的注入电流下,倒装型芯片的出光功率高于垂直型结构芯片。倒装型结构芯片较高的出光功率主要由三种因素造成:1)蓝宝石无色透明,量子阱层内部的光线可以从芯片两侧出射,增强了芯片的出光能力;2)GaAs衬底器件的寄生电阻较大,导致芯片工作时的热能转换较高,电光转换效率较低;3)GaAs衬底吸收的光能最终转换成热能,使器件阱层内部非辐射复合中心数量增加,导致芯片辐射复合产生的光子数量比例下降,器件的电光转换效率降低。为此,本课题组针对采用蓝宝石衬底结构芯片制备的微型倒装AlGaInP LED阵列器件进行研究。

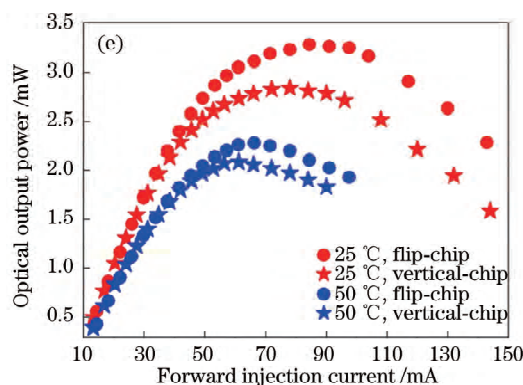
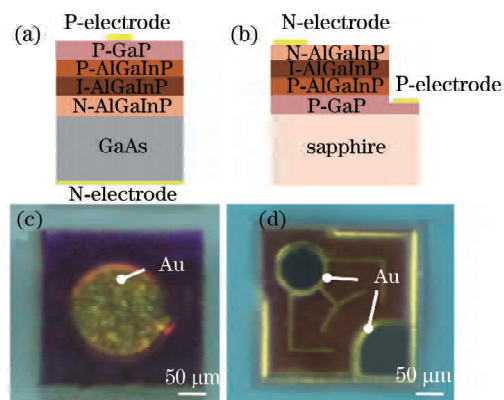


图1 (a)垂直型芯片结构示意图;(b)倒装型芯片结构示意图;(c)垂直型芯片的正表面;
(d)倒装型芯片的正表面;(e)垂直型和倒装型芯片的出光功率曲线

Fig. 1 (a) Schematic of vertical-chip structure; (b) schematic of flip-chip structure; (c) surface of vertical-chip;
(d) surface of flip-chip; (e) optical power curves for vertical-chip and flip-chip

3 微型 LED 阵列器件的光电热模型

将微型 LED 阵列工作电路等效为电热同步的工作模型,如图 2 所示,其中: V_f 为微型 LED 芯片阵列的工作电压; V_o 为阈值电压; K_v 为工作电压随结温变化的比例因子; T_j 为结温; T_o 为初始温度; Q 为微型 LED 的热能; T_{hs} 为基底热阻; T_a 为环境温度; R_{hs} 为基底热阻; R_{jc} 为微型 LED 芯片阵列的热阻; R_s 微型 LED 芯片阵列的热阻; D_{ideal} 为理想二极管。微型 LED 芯片的工作电压可以等效为理想二极管电压、阈值电压和寄生串联电阻 R_s 分压三部分的总和。其中:理想二极管电压应满足肖克莱方程;阈值电压 $V_o = h\nu/q \approx E_g/q$ (h 为普朗克常数; ν 为光子频率; q 为电子电荷)。因此,LED 芯片的正向工作电压可表示为^[16]

$$V_F(I_F, T_j) = \frac{n_i k_B T_j}{q} \ln\left(\frac{I_F}{I_s}\right) + \frac{E_g(T_j)}{q} + R_s I_F, \quad (1)$$

式中: I_F 为正向注入电流; n_i 为理想因子; k_B 为玻尔兹曼常数; I_s 为反向饱和电流; E_g 为禁带宽度。

通常,不考虑温度效应时,LED 的 I - V 特性可表示为

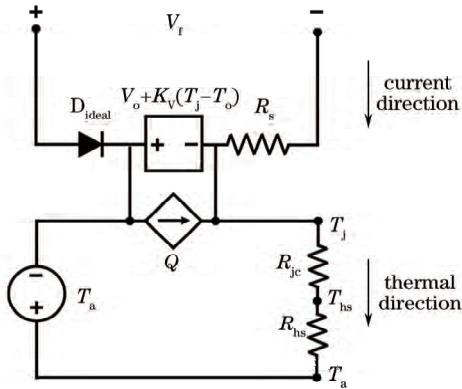


图 2 微型 AlGaInP LED 阵列的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of micro LED array

$$V_F(I_F) = V_o + R_s I_F. \quad (2)$$

由于在 LED 实际工作过程中,PN 能量带隙受温度影响会发生变化,进而导致 LED 芯片的光电性能随温度变化而发生改变。研究表明,LED 正向导通电压与芯片工作结温之间呈线性变换关系^[17]:

$$V_F(I_F, T_j) = V_o + R_s I_F + K_v(T_j - T_o). \quad (3)$$

根据能量守恒定律可知,在注入 LED 的电能中,未转换成光能的能量将转换成热能。通常,可将微型 LED 的热能表示为^[18]

$$Q(I_F, T_j) = K_T V_F I_F, \quad (4)$$

式中: K_T 为生热比例因子,根据实验计算, $K_T \approx 0.8$ 。

由热传递公式可知,阵列芯片温度计算方程应同时满足 $T_j = T_{hs} + R_{jc} Q$ 和 $T_{hs} = T_a + m R_{hs} Q$ 。其中, T_{hs} 为封装基底温度, R_{jc} 为微型 LED 芯片阵列的热阻, m 为阵列芯片数量。根据上述可得阵列芯片结温的表达式为

$$T_j = T_a + (m R_{hs} + R_{jc}) Q. \quad (5)$$

光通量受注入电流和工作结温的共同影响。随正向注入电流增大,芯片光通量逐渐增加;随着结温升高,芯片光通量逐渐下降。根据线性回归方法可得光通量随注入电流的变化^[19]:

$$\Phi(I_F) = a_0 + a_1 I_F, \quad (6)$$

式中: a_0 、 a_1 为线性拟合系数。同理可得光通量随工作结温的变化^[20]:

$$\Phi(T_j) = b_0 + b_1 T_j, \quad (7)$$

式中: b_0 、 b_1 为线性拟合系数。将(6)式和(7)式相乘,再乘以光功率比例系数后,可得 LED 阵列器件的电光热工作计算模型:

$$P(I_F, T_j) = m \Phi_0 (a_0 + a_1 I_F) (b_0 + b_1 T_j), \quad (8)$$

式中: Φ_0 为光功率补偿系数。将(3)式和(4)式代入(8)式后可以得到阵列器件出光功率随注入电流、结温的变化:

$$P(I_F, T_j) = m \Phi_0 \left\{ b_0 + b_1 \left[T_a + (R_{jc} Q + m R_{hs} Q) \frac{I_F}{I_{fo}} K_T \frac{V_o + R_s \frac{I_F}{I_{fo}} + K_T (T_a - T_o)}{1 - \frac{I_F}{I_{fo}} K_T K_v (R_{jc} Q + m R_{hs} Q)} \right] \right\} \left(a_0 + a_1 \frac{I_F}{I_{fo}} \right), \quad (9)$$

式中: I_{fo} 为注入电流校正系数。

阵列芯片数量不同,出光功率与注入电流形成

的线性区间有所不同,可通过注入电流校正系数 I_{fo} 进行调整。

4 阵列器件的制作及出光功率测试分析

4.1 阵列器件制备的工艺流程

采用转印法制备 6×6 倒装 AlGaInP LED 阵列,像素尺寸为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$,具体转印工艺制作流程为:1)采用金属有机气相沉积(MOCVD)技术生长 GaAs 基 AlGaInP 外延片;2)将外延片结构进行衬底转移,生长电极结构,分割成倒装型芯片阵列;3)根据像素阵列尺寸特征制备 PDMS 模具;4)通过 PDMS 印章将制备好的 AlGaInP LED 像素单元转移至电路基底上。

4.2 出光性能

对制备好的倒装 AlGaInP LED 阵列进行出光功率测试,图 4(a)为测试系统示意图。将 LED 阵列芯片置于不同的基底材料上,通过热电偶温控器进行控温,同时采用 FLIR-C3 红外热像仪检测环境的实时温度。采用 OPHIR-LaserStar 光功率计测

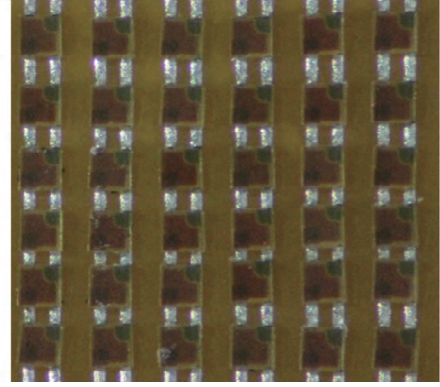


图 3 6×6 倒装 AlGaInP LED 阵列器件

Fig. 3 6×6 flip-chip AlGaInP LED array device

试不同环境温度下 LED 阵列器件的出光功率。图 4(b)为实验测试系统,左上角插图分别为驱动 1 pixel $\times$ 6 pixel LED 芯片实验测试图及 6×6 倒装 AlGaInP LED 阵列器件制备图。图 4(b)中各仪器编号与图 4(a)一致,其中编号 7 为红外热像仪。

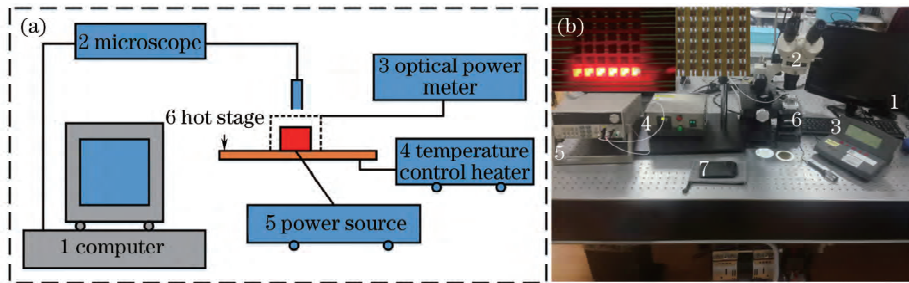


图 4 (a)测试系统示意图;(b)实验测试系统

Fig. 4 (a) Schematic of test system; (b) experimental test system

LED 芯片阵列数量 m 为 1 和 6 时的基本光电热参数测试结果如表 1 和表 2 所示,将参数代入

LED 阵列的电光热计算模型,可以得到 LED 阵列的光功率曲线,如图 5 中的实线所示。

表 1 $m=1$ 时 AlGaInP LED 阵列的光电热参数

Table 1 Photoelectric parameters of AlGaInP LED array with $m=1$

Parameter	I_{fo}	a_0	a_1	b_0	b_1
Value	0.2	0	0.5	-0.001	0.305
Parameter	R_s/Ω	$K_V/(\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$	V_o/V	$R_j/(\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	$\Phi_o/(\text{W} \cdot \text{lm}^{-1})$
Value	20.07	-0.005	1.59	33	80

表 2 $m=6$ 时 AlGaInP LED 阵列的光电热参数

Table 2 Photoelectric parameters of AlGaInP LED array with $m=6$

Parameter	I_{fo}	a_0	a_1	b_0	b_1
Value	1	0	0.08	-0.001	0.303
Parameter	R_s/Ω	$K_V/(\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$	V_o/V	$R_j/(\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	$\Phi_o/(\text{W} \cdot \text{lm}^{-1})$
Value	4.05	-0.002	1.58	53	400

将阵列芯片分别置于热阻值为 10, 15, 35 K/W 的基底材料上进行光功率测试,测试结果在图 5 中由离散的数据点表示。对模型计算结果与实测结果进行对比后可知,两者显示出良好的

一致性。由图 5(a)可知:当只驱动单一芯片时,不同衬底材料上的 LED 均出现光饱和效应;LED 出光功率随基底热阻增大逐渐降低。升高环境温度后,LED 芯片的出光功率随注入电流变化的趋势

不变,但芯片的光功率降低,饱和注入电流前移,LED的光电性能逐渐降低,如图5(b)所示。当 $m=6$ 时,LED的出光功率随衬底热阻增大而逐渐降低,光饱和电流逐渐减小;随着环境温度升高,阵列器件整体的光功率下降,饱和注入电流前移,阵列光电性能逐渐降低,如图5(c)、(d)所示。对比图5(a)、图5(c)和图5(b)、图5(d)可知:阵列器件

的出光功率随驱动阵列像素数量的增加而增大;图5(c)、(d)中的最大出光功率小于图5(a)、(b)中最大出光功率的6倍。由于测试单一像素器件时,像素单元无相邻像素,不存在光被相邻像素吸收的情况。测试阵列像素时,像素单元发出的光入射至相邻像素单元,部分被吸收转化成热能,从而造成出光功率下降。

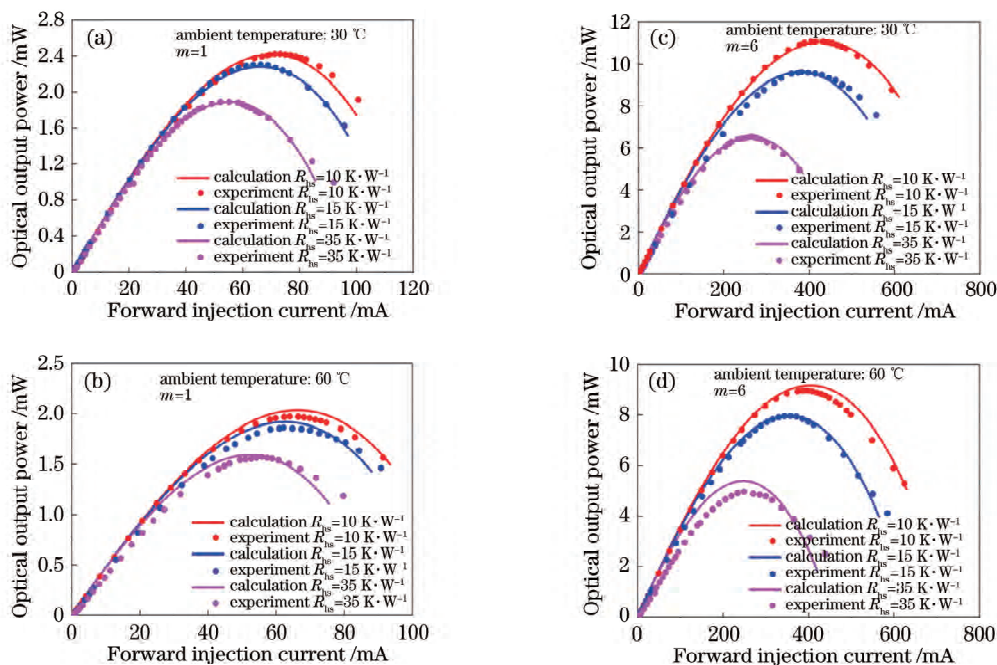


图5 出光功率的理论计算结果与测试结果。(a) $m=1$,环境温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$;

(b) $m=1$,环境温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $m=6$,环境温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $m=6$,环境温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 Theoretical calculation and test results of output power. (a) $m=1$, ambient temperature of $30\text{ }^{\circ}\text{C}$;

(b) $m=1$, ambient temperature of $60\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $m=6$, ambient temperature of $30\text{ }^{\circ}\text{C}$;

(d) $m=6$, ambient temperature of $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

根据测试结果可知,理论计算较为符合LED出光功率的基本特性。对不同环境及不同基底热阻值 R_{hs} 进行计算模拟,结果如图6所示,可见:微型LED阵列器件出光功率曲线随基底热阻值的减小

或环境温度降低而向高峰值方向偏移。因此,可对器件基底热阻、环境温度进行调制,以保证器件在最佳的工作区间工作。

5 基底结构的热阻分析

Cu常被用于制备硬质基底热沉,PDMS可被用于制备微型柔性LED阵列器件的弯曲基底^[21],因此对两种材料的基底热阻进行分析。假设器件在稳定的环境下工作,设计三种不同的基底结构——普通矩形结构、穿孔矩形结构、形柱阵列结构。采用有限元分析不同基底结构热阻值 R_{hs} 随环境变化的关系。设定芯片尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$,Cu的导热系数为 $400\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,PDMS的导热系数为 $0.25\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,空气对流系数为 $30\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,环境温度为 300 K ,热功率密度为 $1\times 10^7\text{ W}/\text{m}^2$ ^[22]。

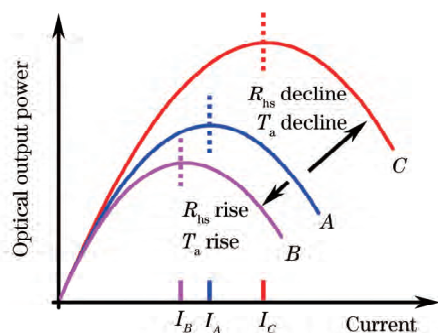


图6 LED阵列出光功率随注入电流的变化

Fig. 6 Variation of output power of LED array with injection current

图 7 所示为两种基底材料在不同结构下的温度分布模拟计算云图。图 7(a)、(c)、(e) 所示为 PDMS 基底的温度分布云图, 可见, 随着基底结构发生改变, 温度依次下降, 且梯度变化较为明显。图 7(b)、(d)、(f) 所示为 Cu 基底的温度分布云图, 可见, 随着衬底结构发生改变, 温度依次下降, 且梯度变化较小。对热阻值与空气对流系数之间的关系进行计算, 得到了 PDMS 和 Cu 基底在不同结构下的热阻值 R_{hs} 与空气对流系数之间的关系, 如图 8 所示。

通过优化衬底结构、增大空气对流速率可有效降低基底热阻, 改善微 LED 阵列器件的光电性能, 如图 8(a) 所示。Cu 材料的导热系数较大, 计算得到的热阻值相对较小, 散热较为均匀; 优化衬底结构、增加空气对流速率对 Cu 基底热阻值的改变相对较小, 如图 8(b) 所示。可见, 通过改变材料结构或增加空气对流速率可实现微型阵列器件对不同基底热阻的需求, 当选用的基底材料的导热系数较大时, 变化效果较为明显。

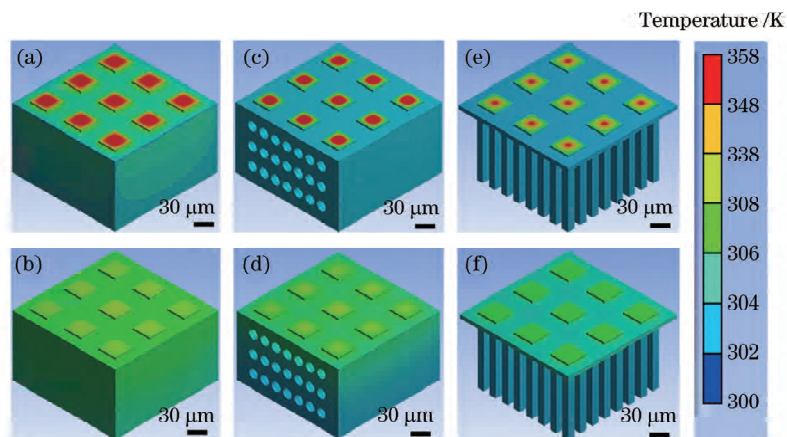


图 7 基底温度分布云图。(a) PDMS 普通矩形基底结构;(b) Cu 普通矩形基底结构;(c) PDMS 穿孔矩形基底结构;(d) Cu 穿孔矩形基底结构;(e) PDMS 形柱阵列基底结构;(f) Cu 形柱阵列基底结构

Fig. 7 Temperature distributions of basement structure. (a) PDMS rectangular basement structure; (b) Cu rectangular basement structure; (c) PDMS perforated rectangular basement structure; (d) Cu perforated rectangular basement structure; (e) PDMS column array basement structure; (f) Cu column array basement structure

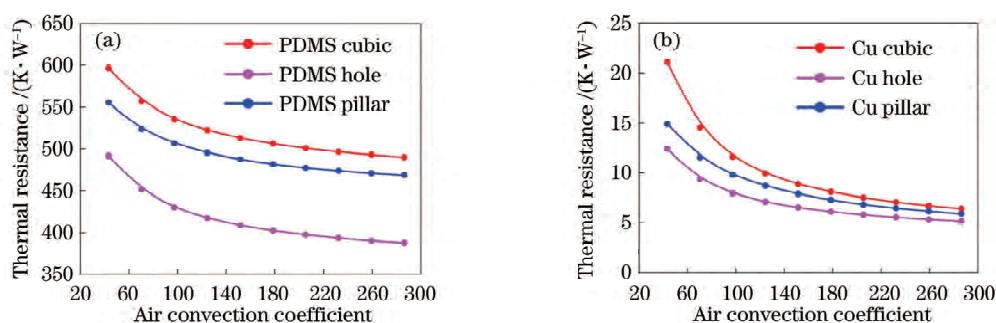


图 8 (a)不同结构下 PDMS 热阻与空气对流系数的关系;(b)不同结构下 Cu 热阻与空气对流系数的关系

Fig. 8 (a) Relationship between thermal resistance of PDMS and air convection coefficient for different structures; (b) relationship between thermal resistance of Cu and air convection coefficient for different structures

6 结 论

本研究测试对比了不同结构的 AlGaInP LED 芯片的出光性能, 分析了倒装型结构芯片出光功率高于垂直结构的原因: 1) 蓝宝石无色透明, 量子阱层内部的光线可从芯片两侧出射, 增强了芯片的出光

能力; 2) GaAs 衬底器件的寄生电阻较大, 导致芯片工作时的热能转换较高, 电光转换效率较低; 3) GaAs 衬底吸收的光能最终转换成热能, 使器件阱层内部非辐射复合中心的数量增加, 导致芯片辐射复合产生的光子数量比例下降, 器件电光转换效率降低。计算得到 AlGaInP LED 阵列器件的出光功

率随基底热阻增大、环境温度升高而逐渐降低,出光饱和处对应的注入电流前移,光电性能逐渐下降。测试了采用转印法制备的 6×6 倒装 AlGaInP LED 阵列器件的出光功率,与计算结果较为一致。分析了 Cu 和 PDMS 基底在不同结构下的热阻随环境温度的变化,当选用的基底材料的导热系数较小时,可以通过优化衬底结构、增大空气对流速率来降低基底热阻,改善微型 LED 阵列器件的光电性能。

参 考 文 献

- [1] Jiang H X, Lin J Y. Nitride micro-LEDs and beyond—a decade progress review [J]. Optics Express, 2013, 21(S3): A475-A484.
- [2] Moreno I, Avendaño-Alejo M, Tzonchev R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. Applied Optics, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [3] Hua H, Mao X L, Tan J H, *et al.* Dynamic illumination design method based on LED array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 102202.
花卉, 毛祥龙, 谭家海, 等. 基于 LED 阵列的动态照明设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 102202.
- [4] Herrnsdorf J, McKendry J J D, Zhang S L, *et al.* Active-matrix GaN micro light-emitting diode display with unprecedented brightness [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(6): 1918-1925.
- [5] Zhao J L, Chong W C, Wong K M, *et al.* A novel BLU-free full-color LED projector using LED on silicon micro-displays [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(23): 2267-2270.
- [6] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [7] Gong Z, Jin S R, Chen Y J, *et al.* Size-dependent light output, spectral shift, and self-heating of 400 nm InGaN light-emitting diodes[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(1): 013103.
- [8] Zhao L, Peng K. Optimization of light source layout in indoor visible light communication based on white light-emitting diode[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706001.
赵黎, 彭恺. 基于白光发光二极管的室内可见光通信光源布局优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0706001.
- [9] Lee S H, Jeong C K, Hwang G T, *et al.* Self-powered flexible inorganic electronic system[J]. Nano Energy, 2015, 14: 111-125.
- [10] Bao X Z, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Current density and irradiance distribution of light-emitting-diode-array device with divided pixels[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(11): 1399-1407.
包兴臻, 梁静秋, 梁中翥, 等. 像素分割对 LED 电流密度及光照度分布的影响[J]. 发光学报, 2016, 37(11): 1399-1407.
- [11] Yadav A, Strassburg M, Rafailov E U. AlGaInP red-emitting light emitting diode under extremely high pulsed pumping [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9768: 97681K.
- [12] Gao D, Wang W B, Liang Z Z, *et al.* Design of micro, flexible light-emitting diode arrays and fabrication of flexible electrodes [J]. Journal of Physics D, 2016, 49(40): 405108.
- [13] Dong Y B, Han J, Xu C, *et al.* High light extraction efficiency AlGaInP LEDs with proton implanted current blocking layer [J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(10): 1303-1306.
- [14] Bao X Z, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* Design and fabrication of AlGaInP-based micro-light-emitting-diode array devices[J]. Optics and Laser Technology, 2016, 78: 34-41.
- [15] Tu S H, Chen J C, Hwu F S, *et al.* Characteristics of current distribution by designed electrode patterns for high power ThinGaN LED [J]. Solid-State Electronics, 2010, 54(11): 1438-1443.
- [16] Schubert E F. Light-emitting diodes [M]. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2014: 102-111.
- [17] Xi Y, Schubert E F. Junction-temperatures in GaN UV light-emitting diodes using the diode forward voltage[C] // Proceedings of IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices, 2005: 84-89.
- [18] Liu G. Fabrication and testing of micro flat heat pipes for light-emitting diode modules[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 1-12.
刘刚. 面向 LED 散热的微平板热管的制造及测试[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 1-12.
- [19] Biber C. LED light emission as a function of thermal conditions [C] // Twenty-Fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. 2008: 9964389.
- [20] Garcia J, Dalla-Costa M A, Cardesin J, *et al.* Dimming of high-brightness LEDs by means of luminous flux thermal estimation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4): 1107-1114.

- [21] Fang S W, Wang W B, Liang J Q, *et al.* Heat dissipation analysis of bendable AlGaInP micro-LED arrays[J]. AIP Advances, 2017, 7(1): 015209.
- [22] Ban Z, Liang Z Z, Liang J Q, *et al.* Thermal analysis and design of AlGaInP-based light emitting diode arrays[J]. Current Optics and Photonics, 2017, 1(2): 143-149.