第36卷 第1期
2016年1月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 36, No. 1
January, 2016

AlGaInP材料LED微阵列热学特性分析

李 贺[1,2] 梁静秋[1] 梁中翥[1] 田 超[1] 秦余欣[1] 吕金光[1] 王维彪[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 发光二极管(LED)微阵列芯片在工作时积累的热量使结温过高,进而对LED微阵列芯片造成一系列不利影响,严重降低LED微阵列芯片工作的可靠性,甚至造成永久性损坏。散热问题是制约LED微阵列芯片工作性能提高的关键因素,是LED微阵列芯片在制备过程中亟待解决的问题之一。利用有限元分析软件,针对AlGaInP材料LED微阵列建立了有限元模型,详细介绍了实体模型建立、网格划分以及边界条件的施加方法。瞬态分析了在脉冲电流驱动下,单个单元和3×3单元工作时阵列的温度场分布,以及温度随时间的变化规律。为了改善阵列芯片的散热性能,设计了一种热沉结构,模拟分析了热沉结构对阵列温度分布的影响。

关键词 光学器件; 热学特性; 有限元分析; 发光二极管微阵列; 热沉; AlGaInP

中图分类号 TN383 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0123001

Thermal Analysis of AlGaInP-Based LED Microarray

Li He[1,2] Liang Jingqiu[1] Liang Zhongzhu[1] Tian Chao[1]
Qin Yuxin[1] Lü Jinguang[1] Wang Weibiao[1]

[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 The accumulated heat of light emitted diode (LED) microarray chip at work will result in an excessive junction temperature, which causes a series of adverse effects on the LED microarray chip, severely reduce the reliability of LED microarray chip and even cause permanent damage. Heat dissipation is a key factor that restricts the improvement of working performance of LED microarray, making it an urgent problem to be solved in the manufacturing process of LED microarray chip. A finite element model of AlGaInP-based LED microarray has been built, and the way of modeling, meshing and applying of the boundary conditions has been introduced. Temperature distributions have been analyzed respectively when a single unit and 3×3 units are driven by a pulse current. In order to improve the heat dissipation performance of LED microarray, a structure of heatsink has been designed, the influence of the heatsink on temperature distribution of microarray has been analyzed.

Key words optical devices; thermal characteristic; finite element analysis; light emitted diode microarray; heatsink; AlGaInP

OCIS codes 230.3670; 120.6810; 190.5970; 160.6000

1 引 言

发光二极管(LED)作为一种自主发光光源,具有发光效率高、响应速度快,耗能低、性能可靠稳定等优点[1]。LED实现了电能向光能的转换,它发出的光来自于载流子在有源区的复合,LED的各层材料都会吸收一部分

收稿日期: 2015-05-25; **收到修改稿日期**: 2015-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61274122)、吉林省科技发展项目(20100351,20120323)、长春市科技发展计划项目(12ZX21)

作者简介: 李 贺(1990—),男,硕士研究生,主要从事LED微阵列芯片方面的研究。E-mail:294811131@qq.com

导师简介: 梁静秋(1962—),女,博士,研究员,主要从事微纳光学器件方面的研究。E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

***通信联系人**。E-mail:wangwbt@126.com

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从有源区辐射跃迁产生的光，光在各层材料间的多次反射大大延长了其在LED内部的传播路径，使得只有小部分的光能从窗口层出射，大部分光能被材料吸收，转化成了热能积聚在LED内部[2-3]。积累的热量所造成的LED结温升高会引起LED量子效率降低、发光强度下降、光谱偏移及元件加速老化等一系列问题，使LED的工作寿命大大缩短[4]。本文研究的LED微阵列芯片，是利用微光机电系统(MOEMS)技术，在一块AlGaInP外延片表面制作出若干规则排列发光单元，每个单元可以被单独驱动，且单元之间具有良好的光学和电学隔离，LED微阵列芯片与传统的LED阵列器件相比具有封装尺寸小、发光效率高、亮度高、电流密度均匀等优点，在显示、照明、通讯等领域具有广阔的应用前景[5]。其热学性能受单元排布规律、单元结构、器件材料及制作工艺等多方面因素影响，与传统的LED器件有较大的差别，并且伴随着LED微阵列芯片单元集成度的提高和功率的增大，LED微阵列的散热问题变得更具挑战性，成为了制约LED微阵列芯片发展的关键因素之一[6]。实验中可以通过测量光谱偏移来测量结温，但是这种方法对实验人员的操作以及实验仪器都有很高的要求，实现起来具有相当大的难度。目前，LED微阵列器件的研制正处于实验阶段，市场上还没有成熟的产品，关于LED的热学特性分析主要是针对单管LED及单管LED组成的阵列，针对LED微阵列热学特性的分析很少见到。通过模拟，了解LED微阵列器件的热学性能，对优化器件结构及改进制作工艺提供了重要的依据。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材料LED微阵列芯片在不同工作状态下的温度分布情况，模拟分析了增加热沉结构对阵列温度分布的影响。

2 模 型

对基于MOEMS技术的AlGaInP材料LED微阵列芯片进行分析，图1为芯片实物图及芯片发光单元剖面结构示意图。

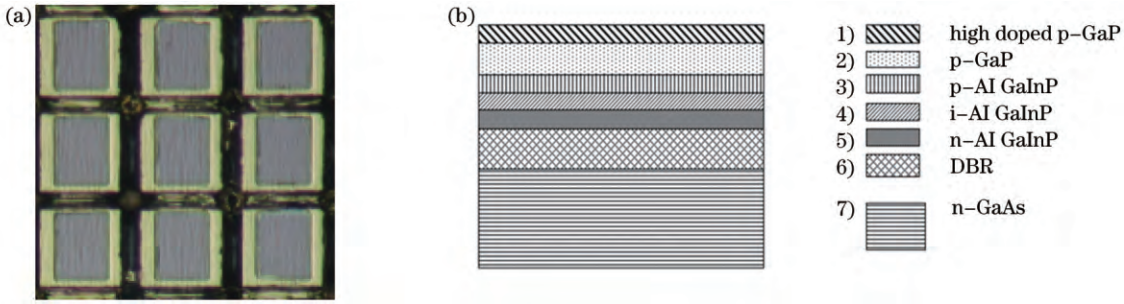

图1 AlGaInP材料LED微阵列芯片(a)发光单元实物图及(b)单元剖面示意图

Fig.1 (a)Light-emitting unit and (b)cross-section of light-emitting unit of AlGaInP-based LED microarray

芯片厚度为90 μm，单元尺寸为80 μm×80 μm，单元个数320×240。单元之间通过20 μm宽聚酰亚胺隔离，电极形状为回型[7-9]。模型中所用到的材料参数如表1所示[10-12]。表1中c为材料比热容；K为导热系数；ρ为密度；H为厚度。

表1 模拟中所用材料参数

Table 1 Materials parameters used in simulation

	c /(J/Kg·K)	K /(W/K·m)	ρ /(Kg/m^3)	H /μm
Au	132.3	301	19320	2
GaP	434.4	77	4130	7.2
AlGaInP	337	8.2	4200	1.2/0.8/0.8
GaAs	327	46	5318	90
Pi	1100	0.3	2700	90

选取整个芯片中的5×5个单元进行模拟，采用自上至下的方法在x-y-z坐标系中建立实体模型。所建立模型如图2所示。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

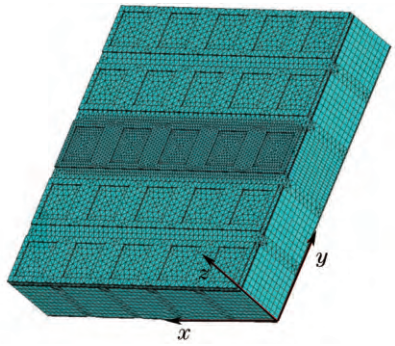

图2 AlGaInP材料LED微阵列有限元模型

Fig.2 Finite element model of AlGaInP-based LED microarray

3 边界条件

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[13]：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z})+q_v=\rho c\frac{\partial T}{\partial t}\ , \tag{1}$$

它以能量守恒定律和傅里叶定律为基本依据，式中 q_v 为热功率密度；T 为瞬态温度场；λ_x，λ_y，λ_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。

对于稳态热传导过程，温度场不随时间变化，此时由(1)式可得稳态热传导问题的微分方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z})+q_v=0\ . \tag{2}$$

模拟芯片处在空气自然对流条件中的情况，设定阵列初始温度为20℃，忽略芯片的热辐射[14]。热量在芯片内部以热传导的方式扩散，5×5阵列作为芯片整体的一部分，为了模拟实际情况，在模型4个侧面上的所有节点上施加了沿法线方向的热流密度。这一步骤通过参数化编程实现，以计算x方向上的热流密度为例：

选取模型侧面上的节点，计算节点的位置坐标x_1和节点的温度T_1，找到该节点在x方向上距离最近的节点，计算其节点坐标x_2和节点温度T_2。在侧面x方向的的温度梯度g_x可以通过下式计算：

$$g_x=\frac{T_1-T_2}{X_1-X_2}\ . \tag{3}$$

则可以得到模型侧面X方向的热流密度为：

$$q_x=-\lambda g_x=-\lambda\frac{T_1-T_2}{X_1-X_2}\ . \tag{4}$$

重复以上步骤，直至得到侧面上所有节点在法线方向的热流密度并施加给各个节点。

芯片上下表面与空气接触，通过自然对流向外部空气交换热量。设定对流系数为10 W/(m^2·K)，空气温度为20 ℃，并假设对流系数不随温度变化[15]。在电压为2 V，电流的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。有源层处在量子阱结构中，光子的发射和吸收主要集中在有源层，所以器件工作时的绝大部分热量从有源层产生，所以在边界条件的设置时假设热源全部集中在有源层。热功率密度的计算公式为：

$$H=\frac{P}{V}\ , \tag{5}$$

式中H为热功率密度；P为热功率；V为热源区体积。根据计算结果，将热源的功率密度设定为2×10^{11} W/m^3。

4 模拟结果分析

4.1 单个单元工作时阵列瞬态温度分布

瞬态分析了位于阵列中心的单个发光单元在图3所示的50 Hz，0.6 mA脉冲电流驱动下工作的温度分布。

在点A(x=−24 μm, y=0 μm, z=92 μm)、点B(x=24 μm, y=0 μm, z=92 μm)间建立路径P(如图4所示)，用于获取有源层上沿x方向的温度分布。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

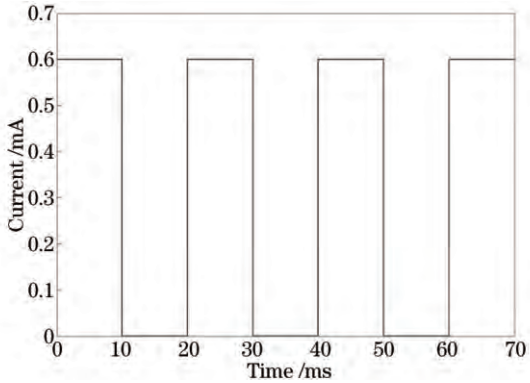

图3 脉冲电流波形示意图

Fig.3 Current pulse shape

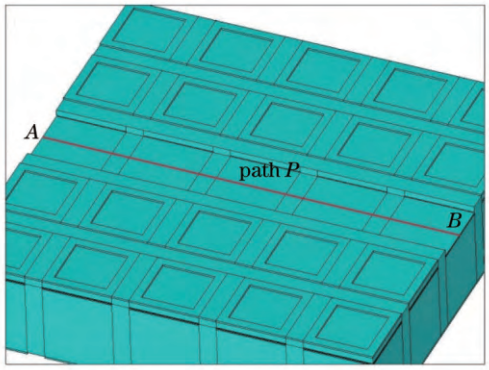

图4 路径P示意图

Fig.4 Schematic diagram of path P

图5给出了1、5、10、15、20 ms时沿路径P的温度分布曲线。图6为10 ms和20 ms时阵列温度云图。由图5可知，在加驱动电流后阵列温度开始上升，由于热源位于有源层，有源层中心位置升温速度最快，热量从工作单元有源层向外传导，温度随距热源距离的增加而逐渐降低，由于隔离沟槽填充材料导热系数较低，热量在此处传导速度较慢，所以在隔离沟槽位置的两端有较高的温度差。10 ms时中心单元有源区温度达到最大的20.5 ℃。10 ms后电流消失，阵列温度开始下降，从曲线可以看出，沟槽温度下降速度较慢，20 ms时最高温度位置在中心单元两侧的沟槽中。一个周期内热量不能完全散去，产生热量积累，前一周期的最终温度将作为下一周期的初始温度继续升温。

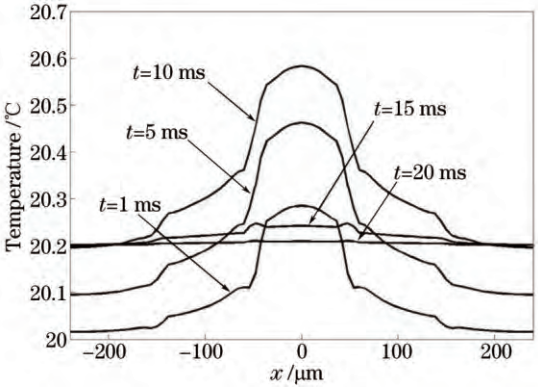

图5 1、5、10、15、20 ms时沿路径P的温度分布曲线

Fig.5 Temperature distribution along path P at 1, 5, 10, 15, 20 ms

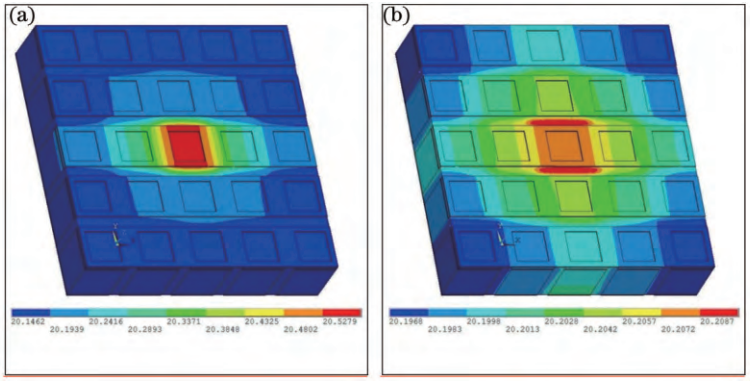

图6 (a)10 ms和(b)20 ms时LED阵列温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution of LED microarray at(a)10 ms and (b)20 ms

图7给出了30 ms、40 ms、50 m、60 ms、1.97 s、1.98 s、1.99 s和2.00 s时沿路径P的温度分布曲线。当不考虑阵列的对流散热及热量向5×5阵列外位置传导时，2.00 s时整个阵列平均温升ΔT可由下式计算

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\Delta T=\frac{Ht}{2\times\sum_i c_i m_i}, \tag{6}$$

式中i为材料编号，H为热功率密度，代入数据得到2.00 s时ΔT=22.5 ℃，当考虑阵列对流散热及热量向5×5阵列以外传导时，实际温度要低于该值。从2.00 s时的结果可以看出阵列最高温升10.6 ℃，小于ΔT，说明模拟得到的结果在合理范围内。

通过图7可以看出，相邻两个周期的温度变化曲线随时间趋于一致，说明在热源功率不变的情况下，随温度升高有更多的热量通过热对流和热传导的方式传递出去，温升变得缓慢。

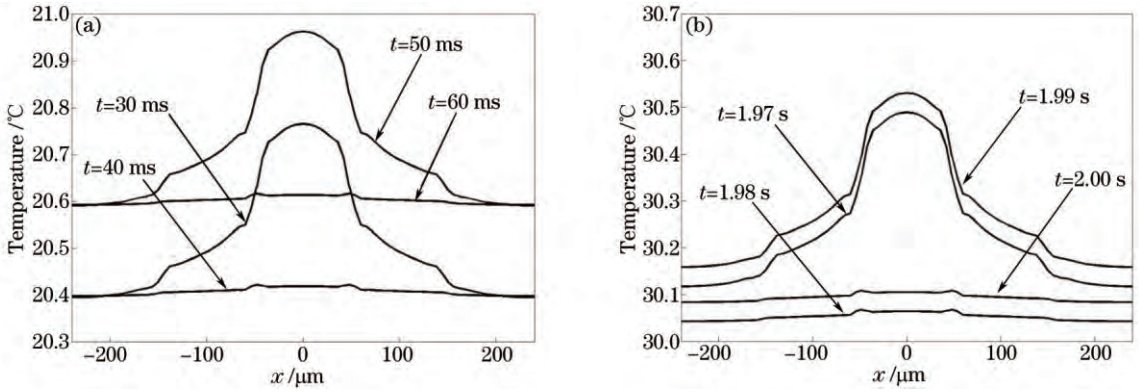

图7 30 ms、40 ms、50 ms、60 ms、1.97 s、1.98 s、1.99 s和2.00 s时沿路径P的温度分布曲线

Fig.7 Temperature distribution along path P at 30 ms, 40 ms, 50 ms, 60 ms, 1.97 s, 1.98 s, 1.99 s and 2.00 s

图8给出了中心单元有源层中心位置的温度随时间变化曲线。温度曲线以电流频率震荡上升，震动幅度逐渐加大。而随温度升高，一个脉冲周期中的最高温度和最低温度趋于恒定值。

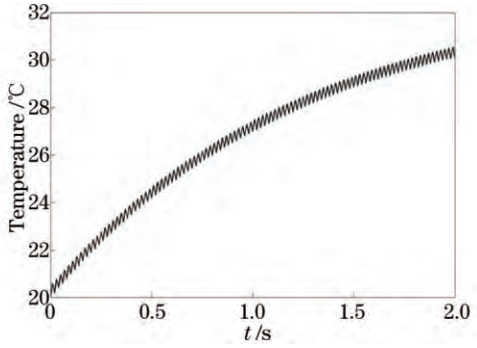

图8 有源层中心温度随时间变化曲线

Fig.8 Temperature-time curve of central position of the active layer

4.2 3×3单元工作时阵列瞬态温度分布

瞬态分析了3×3个单元同时在50 Hz，0.6 mA脉冲电流驱动下工作的温度分布。图9给出了3×3单元工作时1.97 s、1.98s、1.99 s和2.00 s时沿路径P的温度分布曲线。由图9可以看出，3×3个单元工作时，阵列温度明显高于单个单元工作的情况。在多个单元同时工作时，会产生热量的交叠，温度分布曲线在中心位置出现峰值。图10给出了1.99 s时的温度分布云图。

图11为中心单元的有源层中心位置温度随时间的变化曲线，从图中可以看出，温度随时间震荡上升，工作2.00 s后，最高温度达到112.1 ℃。3×3单元工作时产生的热量是单个单元工作时产生热量的9倍。当不考虑散热和热量向5×5阵列以外传导时，通过(6)式计算得到2.00 s时阵列平均温升ΔT=202.5 ℃。当考虑散热及热量向5×5阵列以外传导时，实际温度要低于该值。在模拟中，2.00 s时阵列最高温升92.1 ℃，小于ΔT，说明模拟结果在合理范围内。

从模拟结果可以看出，结温已经超出LED可靠工作的温度范围[16]，为保证LED微阵列在更多单元同时工作时保持长时间稳定工作状态，必须改善LED微阵列的散热性能。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

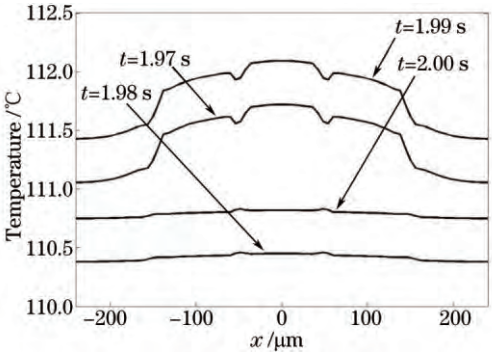

图9 1.97、1.98、1.99、2.00 s时沿路径P的温度分布曲线

Fig.9 Temperature distribution along path P at 1.97, 1.98, 1.99, 2.00 s

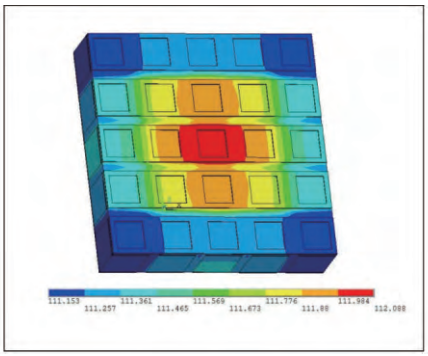

图10 1.99 s时阵列温度分布云图

Fig.10 Temperature distribution of LED microarray at 1.99 s

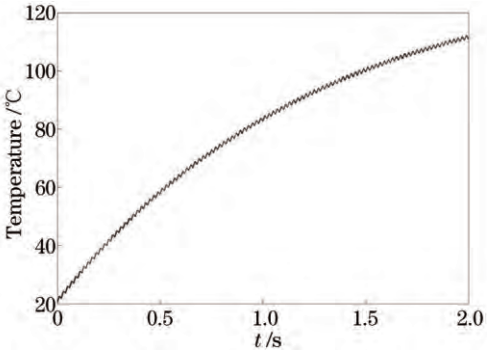

图11 有源层中心温度随时间变化曲线

Fig.11 Temperature-time curve of central position of the active layer

4.3 热沉结构对LED阵列温度分布的影响

为了研究热沉结构对器件散热性能影响，模拟了在5×5阵列底部连接热沉结构时的温度分布情况。热沉横截面为矩形，横截面尺寸为480 μm×480 μm，高3 mm，材料为铜。阵列与热沉之间有一层100 μm厚的AlN绝缘层。

图12给出了增加热沉结构后3×3单元工作时有源层中心位置温度随时间变化的曲线，通过对比图12和图11可知，阵列温度显著降低。2s时有源层中心温度由110.8 ℃降为23.5 ℃。图13给出了1.99 s时阵列以及热沉结构的温度分布云图。

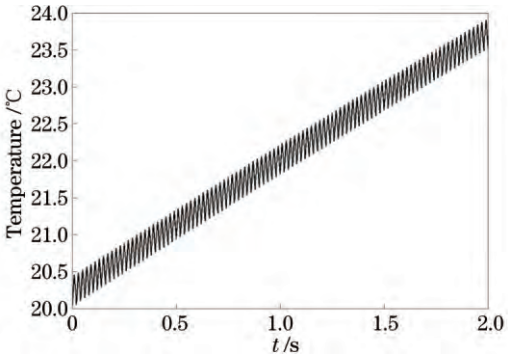

图12 增加热沉结构后有源层中心温度随时间变化曲线

Fig.12 Temperature-time curve of central position of active layer after adding a heatsink structure

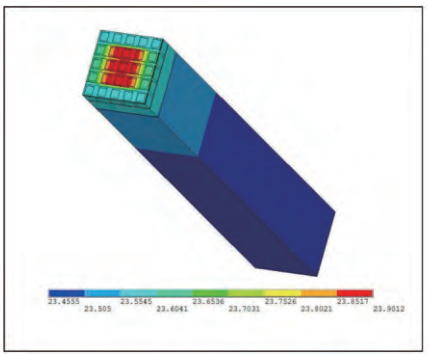

图13 增加热沉结构后1.99s时阵列温度分布云图

Fig.13 Temperature distribution of LED microarray with heatsink structure at 1.99s

从结果中可以看出，增加热沉结构后器件温度显著下降，2.0 s时的温度从112.1 ℃下降到23.9 ℃。为保证芯片长时间稳定工作，或者更多的单元同时工作，阵列芯片还需具有更强的散热能力，可以通过改变翅片形状、热沉材料，或采用强制对流等手段对热沉做进一步的优化[6]。以上模拟结果为进一改善芯片的散热性能提供了依据。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 结 论

利用有限元软件建立了AlGaInP材料的LED微阵列的有限元模型，介绍了模型建立、网格划分以及边界条件的施加方法。模拟了在50 Hz，0.6 mA脉冲电流驱动下，单个单元和3×3单元工作时阵列的温度分布情况。通过对模拟结果进行分析，发现在施加驱动电流后有源层中心位置升温速度最快，热量从中心向外传导。热量在绝缘层中传递速度较慢，使绝缘层的两端有较高的温度差。沿电极方向的热阻相对较低，电极方向温度升高速度较快。一个脉冲周期后热量不能完全散去，产生热量积累，前一周期的最终温度将作为下一周期的初始温度继续升温。随着温度上升，芯片温度的变化趋向于与脉冲电流一致的周期性。多单元同时工作时会产生热量交叠，最终将使芯片局部温度超过正常工作温度上限，需要提高芯片的散热性能来使其正常工作，增加可靠性。设计了一种改善阵列散热性能的热沉结构，分析了热沉结构对阵列温度的影响。模拟结果为进一步优化热沉结构或增加其他散热途径提供了依据。

参 考 文 献

1 Zheng Feng, Liu Liying, Liu Xiaoxi, *et al.*. Control of correlated color temperature for multi-primary color LED illumination[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 926-933.
郑 峰, 刘丽莹, 刘小溪, 等. 多主色LED照明光源的相关色温调控[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(4): 926-933.

2 Joong Yeon Cho, Kyeong Jae Byeon, Jin Seung Kim, *et al.*. Improved AlGaInP vertical emittinglight-emitting diodes using direct printing [J]. Opt Lett, 2013, 38(9): 1573-1575.

3 Jui Wen Pan, Pei Jung Tsai, Kao Der Chang, *et al.*. Light extraction efficiency analysis of GaN-based light-emitting diodes with nanopatterned sapphire substrates[J]. Appl Opt, 2013, 52(7): 1358-1367.

4 Liang Jingqiu. Research advances in micro-LED display devices[J]. OME Information, 2010, 27(12): 21-27.
梁静秋. 微显示器件的研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 21-27.

5 Qi Dai, QifengShan, Jing Wang, *et al.*. Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(13): 1-3.

6 Guo Lingxi, Zuo Dunwen, Sun Yuli, *et al.*. Heat dissipation technology of LED and its research process[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24(4): 64-70.
郭凌曦, 左敦稳, 孙玉利, 等. LED散热技术及其研究进展[J]. 照明工程学报, 2013, 24(4): 64-70.

7 Liang Jingqiu, Li Jia, Wang Weibiao, *et al.*. Design and fabrication of AlGaInP LED array[J]. Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays, 2006, 21(6): 604-608.
梁静秋, 李 佳 王维彪, 等. LED阵列的设计和制作工艺研究[J]. 液晶与显示, 2006, 21(6): 604-608.

8 Tian Chao, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Design and experiment AlGaInP micro-LED arrays with double strip electrode[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(11): 840-845.
田 超, 梁静秋, 梁中翥, 等. 双条形电极结构AlGaInP-LED微阵列器件的设计和实验研究[J]. 发光学报, 2013, 34(11): 840-845.

9 Liang Jingqiu, Li Jia, Wang Weibiao. Design and fabrication of AlGaInP LED array[J]. Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays, 2006, 21(6): 604-608.
梁静秋, 李 佳, 王维彪. LED阵列的设计和制作工艺研究[J]. 液晶与显示, 2006, 21(6): 604-608.

10 Dai weifeng. Transient thermal analysis of highpower LED package[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(3): 324-328.

11 Myung Sub Kim, Hee Kwan Lee, Jae Su Yu. Device characteristics and thermal analysis of AlGaInP-based red monolithic light-emitting diode arrays[J]. Semicond Sci Technol, 2013, 28 (025005): 1-8.

12 Zhang Jianfeng, Wang Cuiling, WuYuping, *et al.*. Application of ANSYS in heat-analysis[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2004, 23(5): 9-12.
张建峰, 王翠玲, 无玉萍, 等. ANSYS有限元分析软件在热分析中的应用[J]. 冶金能源, 2004, 23(5): 9-12.

13 Younes Shabany. Heat Transfer: Thermal Management of Electronics[M]. Yu Xiaoling, Wu Weifeng, Liu Feilong, Transl. Beijing: China Machine Press, 2013: 135-158.
夏班尼. 传热学：电力电子器件热管理[M]. 余小玲, 吴伟烽, 刘飞龙译. 北京: 机械工业出版社, 2013: 135-158.

14 Hu Liming, Li Zaijin, Qin Li, *et al.*. Thermal analysis of high-power, high-duty-cycle laser diode array[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1055-1060.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

胡黎明, 李再金, 秦　莉, 等. 高占空比大功率半导体激光线阵热特性分析[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1055-1060.

15 Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.*. Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1002003.

张建伟, 宁永强, 张　星, 等. 基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1002003.

16 Liu Xue. Reliability Research of LED Road Lamp Design Technology[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012: 36-66.

刘　学. LED路灯可靠性设计技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012: 36-66.

栏目编辑: 韩　峰

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net