

## 有机电致发光器件的热学特性分析

张稳稳<sup>1</sup>, 李 格<sup>1</sup>, 雷小丽<sup>2</sup>, 严学文<sup>1</sup>, 柴宝玉<sup>1</sup>

(1. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121; 2. 西安邮电大学 理学院, 陕西 西安 710121)

**摘 要:** 采用 COMSOL 有限元分析软件的固体传热模块, 对有机电致发光器件(OLED)的热学特性进行了仿真, 发现器件温度随着输入功率成线性增大。在驱动电流为  $150 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 仿真结果表明,  $\text{Alq}_3$  发光层的最高温度为  $82.9943 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 玻璃基板下表面的最高温是  $77.3926 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 器件阴极表面中心区域的最高温度为  $82.9942 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其平均温度为  $78.445 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过改变功能层热传导率、功能层厚度、对流换热系数、表面发射率等参数模拟其对 OLED 器件热学特性的影响, 结果表明, 当增加基板的热传导率时, OLED 器件温度显著下降而且表面及内部温度梯度大幅减小; 提高空气对流换热系数及基板的表面发射率, OLED 的温度可以大幅减小。而其他参数则对其影响并不明显。

**关键词:** 有机电致发光器件; 有限元分析; 温度分布; 热学特性; 散热

**中图分类号:** TN383<sup>+</sup>.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0720001

## Analysis of thermal characteristics of organic light emitting device

Zhang Wenwen<sup>1</sup>, Li Ge<sup>1</sup>, Lei Xiaoli<sup>2</sup>, Yan Xuewen<sup>1</sup>, Chai Baoyu<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post & Telecommunication, Xi'an 710121, China;

2. School of Science, Xi'an University of Post & Telecommunication, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** The Joule heating inside organic light-emitting devices (OLEDs) is part of the device degradation factors. Therefore, it is very important to study the thermal characteristics of OLEDs for effective heat dissipation. So the thermal characteristics of OLED were simulated via the solid heat transfer module of COMSOL finite element analysis software. It is found that the device temperature increases linearly with the input power. At driving current of  $150 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , the highest temperature of the  $\text{Alq}_3$  emitting layer and bottom surface of the glass-substrate are  $82.9943 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $77.3926 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectively, the highest temperature at the central region of the cathode surface is  $82.9942 \text{ }^\circ\text{C}$ , and its average temperature is  $78.445 \text{ }^\circ\text{C}$ . Thermal analysis simulated results show the temperature distribution and thermal characteristics of an OLED can be affected by changing the thermal conductivity and thickness of functional layer, convection heat transfer coefficient, and surface emissivity. When increasing the substrate thermal conductivity, the temperature of the OLED is significantly reduced, and the surface and internal temperature gradients are greatly reduced; When improving the air convection heat transfer coefficient and the surface emissivity of the substrate, the temperature of the OLED can be greatly reduced. However, other parameters have no significant effect on improving thermal characteristics for the OLED.

**Key words:** organic light emitting device; finite element analysis; temperature distribution; thermal characteristics; thermal dissipation

收稿日期: 2018-02-14; 修订日期: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61505161); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM6064, 2017GY-189); 陕西省教育厅专项科研计划(17JK0700)

作者简介: 张稳稳(1977-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光电子器件及性能测试方面的研究。Email: zhangwenwen@xupt.edu.cn

## 0 引言

有机电致发光器件(Organic light-emitting device, OLED)是利用有机发光材料在一定的电场作用下激发辐射发光的显示器件,属于自发光器件,具有低功耗、高亮度、响应快、轻薄、发光效率高等优势<sup>[1-2]</sup>。在新型显示技术及未来节能照明光源方面表现出了巨大的应用潜力。

OLED 器件的发光效率不高,绝大部分的注入能量都转换成热能<sup>[3]</sup>,大量的焦耳热对 OLED 器件产生严重的副作用,主要体现在以下三个方面:首先,焦耳热会对器件亮度的均匀性产生影响,特别是大尺寸的发光点。Garditz 等人认为在外量子效率一定时,升高的温度会引起更高的局部电流,最终导致了发光亮度的不均匀分布<sup>[4]</sup>。其次,焦耳热产生的高的器件温度能使有机薄膜的表面形貌发生变化。LG 公司的 Kim 等人研究认为,对多层薄膜加热,使薄膜内部产生拉伸力;冷却薄膜,又会使薄膜内部产生压缩力。在加热到适当温度时,拉伸力与压缩力相互抵消。而如果压缩力大于拉伸力,就产生了波纹结构;如果拉伸力大于压缩力,则不会产生波纹<sup>[5]</sup>。最后,焦耳热效应对器件内部缺陷处的影响更为突出。Savvate'ev 和 Zhou 等人研究表明,短路点的焦耳热使有机层与金属层分层产生气泡,在气泡周围电流密度会进一步增大产生更大的焦耳热,进而金属会形成针孔导致电极短路,形成不发光的黑斑点<sup>[6-7]</sup>。因此热失效和热退化成为了影响 OLED 器件稳定性的一个主要因素。

为了提高器件的热稳定性,国内外研究人员在 OLED 热学特性和散热分析研究上投入大量的精力,并取得了一定的研究进展。Sturm 等人指出, OLED 输入功率的失散方式是:器件发光、热辐射、对流和从显示器件边沿电路元件的失散。其中对流作用最大<sup>[8]</sup>。Boroumand 等人发现相同驱动电压和输入电流密度下,器件温度升高与发光面积成正比。他们认为 OLED 器件的主要散热机制是器件和热沉之间的热传导<sup>[9]</sup>。Park 等人对薄膜封装的 OLED 器件进行热学分析,发现最高温度出现在电子传输层内部靠近界面处<sup>[9]</sup>。Bergemann 等人发现封装盖和基板之间空气间隙对传热特性呈现出了最大的热阻抗<sup>[10]</sup>。

上海大学的研究人员发现 OLED 的热学特性与面板的取向和气流速度紧密相关<sup>[11]</sup>。华南理工大学的研究人员也利用 ANSYS 有限元分析软件的热分析模块对有机电致发光器件的温度场和热流分布进行了分析<sup>[12]</sup>。但是 OLED 热学特性的一些问题目前还尚未清楚,还需要进一步探索研究。

文中采用有限元仿真软件,建立 OLED 热学仿真模型。对不同工作条件下的 OLED 热学特性进行系统研究,探索影响温度分布的因素。结果表明, OLED 表面及器件内部存在明显的温度梯度,最高温度出现在发光层靠近阴极层,基板热传导系数和温度梯度密切相关。改变器件表面性质,可以有效降低器件温度。对于未封装 OLED 器件,改变基板侧的表面性质,效果明显。对于封装器件,封装材料和基板的热传导率和表面性质同等重要。在 OLED 器件实际应用时,应根据器件传热特性,结合使用场合及周围环境进行散热设计以提高器件的发光效率与稳定性。

## 1 数值仿真与实验

实验所用 OLED 是真空蒸镀在方块电阻为  $15 \Omega$  的氧化铟锡(ITO)玻璃基板上的,蒸镀时气压约为  $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。ITO 作为阳极,器件结构为 ITO (110 nm)/NPB(60 nm)/Alq<sub>3</sub>(60 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(100 nm)。其中 NPB 作空穴传输层,Alq<sub>3</sub> 作发光层兼作电子传输层,LiF 作电子注入层,Al 作金属阴极。有机材料的蒸镀速度为  $0.2 \sim 0.3 \text{ nm/s}$ ,金属阴极的蒸镀速率为  $0.3 \sim 0.5 \text{ nm/s}$ ,蒸发速度和厚度使用石英晶体振荡的方法来监测。玻璃基板厚度为  $1.1 \text{ mm}$ ,器件发光面积为  $3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。电学特性及亮度使用 2602 源表及校准过的硅光电二极管在室温大气环境下进行测量,室温为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。器件温度测量值是采用热电偶及其导热硅脂在阴极表面所测。

热学仿真用的是 COMSOL Multiphysics 软件中的固体传热模块,这个模块采用有限元方法求解热传导方程,可以解决包括热传导、热对流、热辐射以及三者任意组合的问题。自然对流换热系数假定为  $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,玻璃、Al 表面发射率分别假定为 0.8 和 0.05<sup>[13]</sup>,材料的热传导率如表 1 所示,并假定所有材料的热传导率不随温度变化。

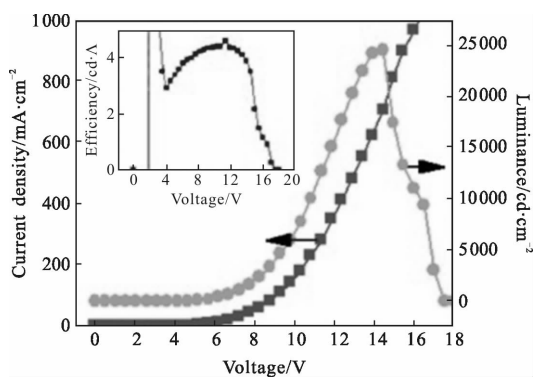
表 1 热传导系数值

Tab.1 Thermal conductivity values

Layer	Value/W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>
Glass	1.05 <sup>[9]</sup>
ITO	12 <sup>[9]</sup>
NPB	0.107 <sup>[9]</sup>
Alq <sub>3</sub>	0.107 <sup>[9]</sup>
LiF	4.01 <sup>[13]</sup>
Al	237 <sup>[13]</sup>

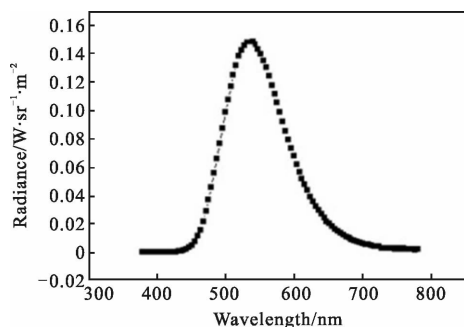
## 2 结果与讨论

图 1(a)是器件的电学特性图,当驱动电压为 10.08 V 时,驱动电流为 150 mA · cm<sup>-2</sup>(18 mA),起始亮度为 7 600 cd · m<sup>-2</sup>,器件 EL 光谱如图 1(b)所示,大约有 1.19% 的电转换成光能。图 2(a)是驱动电流为 150 mA · cm<sup>-2</sup> 时的器件阴极表面温度分布仿真



(a) 电学特性

(a) Electrical characteristics of device



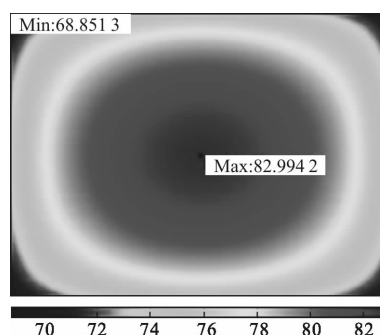
(b) EL 光谱

(b) EL spectrum of device

图 1 器件电学特性及 EL 光谱

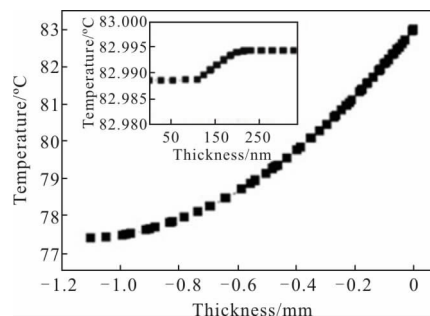
Fig.1 Electrical characteristics and EL spectrum of device

图,由于玻璃基板的热传导系数较低,而且发光区域远小于基板面积,因此出现了较为明显的温度梯度,最高温度出现在中心区域,为 82.994 2 °C,最低温度出现在边缘角,为 68.851 3 °C,阴极表面的平均温度为 78.445 °C。图 2(b)为器件厚度方向的温度分布仿真(器件中轴线, -1.1 mm 玻璃表面, 330.5 nm 阴极表面),嵌图为功能层局部温度分布,可以看出,器件的最高温度为 82.994 3 °C,处于靠近阴极表面的发光层,因此,经常用阴极表面温度代表器件工作温度,在文中,器件温度仿真值指的是发光区域阴极表面平均温度。



(a) 阴极表面温度分布

(a) Surface temperature distribution of cathode



(b) 器件厚度方向温度分布

(b) Temperature distribution of device thickness

图 2 驱动电流为 150 mA · cm<sup>-2</sup> 时的器件热学仿真  
Fig.2 Simulation results of the OLED at current density of 150 mA · cm<sup>-2</sup>

图 3 是不同输入功率条件下的器件温度的仿真值和实际测量值,从结果可知,器件温度随着输入功率的增大而增大,在低功率端呈线性增大,在大功率段,温度增加趋缓,偏离了之前的线性,这主要是因为大电流下,ITO 电极图案消耗功率比例增大,加载在发光区域的有效输入功率比例降低。在低功率段,

仿真值和测量值基本重合,但是在大电流大功率段,测量值显著低于仿真值,这是因为此时器件温度已经超过了 NPB 的结晶化温度 95 °C, NPB 的形貌已经发生了变化,可能出现了有机材料结晶或别的形貌变化,加速器件衰减,热传导率也发生变化。在仿真中没用考虑这些因素。总之, OLED 的热有限元仿真模型能够有效模拟 OLED 的温度分布,可以以此来进行热学特性分析。

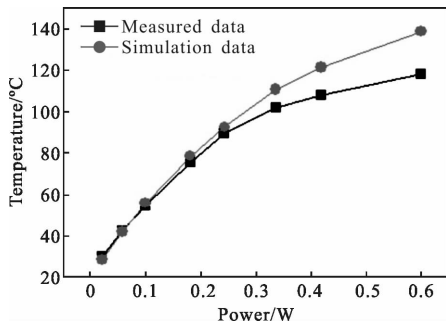


图 3 器件温度随着输入功率的变化

Fig.3 Relationship between device temperature and power density

### 2.1 热传导率对热学特性的影响

图 4 是电极热传导率对器件温度的影响,可以看出随着阳极和阴极热传导率的增大,器件温度降

低,但是整体变化却很小。这是因为 OLED 器件功能层整体厚度不过几百纳米,散热路径较短,因此,功能层的热传导率对器件温度分布影响不大,这和 Park 等人的研究结果类似<sup>[11]</sup>。

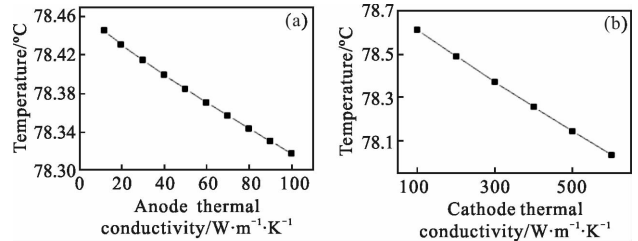


图 4 电极热传导率对器件温度的影响

Fig.4 Device temperature with different electrode thermal conductivity

图 5 是基板的热传导率和器件温度的变化曲线,从图 5(a)可以看出,增加基板的热传导率,器件温度开始大幅下降,而到了一定程度,基本饱和。图 5(b)中可以看出,提高基板的热传导率,使得器件表面温度均匀性提高,器件厚度方向上的温度梯度减小,如图 5(c)所示。这是因为基板热传导率增大到一定程度,器件内部热量基本都传递出来了,器件内部和表面温度基本相等。

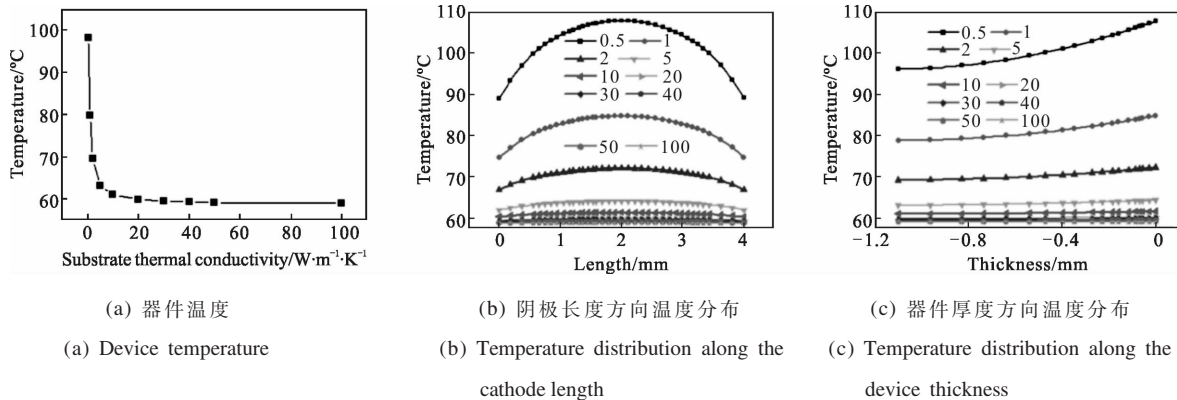


图 5 基板热传导率对器件温度的影响

Fig.5 Device temperature with different substrate thermal conductivity

根据热流量( $\phi$ )的定义,在单位时间( $t$ )内,从平面的高温( $T_H$ )到低温( $T_L$ )传递的热量  $Q$ ,如公式(1)所示。

$$\phi = Q/t = kA \frac{T_H - T_L}{d} \quad (1)$$

式中: $A$  为面积; $d$  为厚度; $k$  为材料的热传导率,对于 OLED 这种多层薄膜器件,公式(1)可以改写成公

式(2)。对于图 1 所示的 OLED 器件, OLED 发光层温度最高,热量从发光层分别向基板侧和阴极侧传递,热流量分别表示为公式(3)和(4),  $T_{L1}$  和  $T_{L2}$  分别为基板和阴极表面温度。

$$\phi = \frac{(T_H - T_L)}{\sum_i ((d_i/k_i)/A_i)} \quad (2)$$

$$\phi_{\text{Substrate}} = \frac{T_H - T_{L1}}{d_{\text{NPB}} / (k_{\text{NPB}} A_{\text{NPB}}) + d_{\text{ITO}} / (k_{\text{ITO}} A_{\text{ITO}}) + d_{\text{Substrate}} / (k_{\text{Substrate}} A_{\text{Substrate}})} \quad (3)$$

$$\phi_{\text{Cathode}} = \frac{T_H - T_{L2}}{d_{\text{LiF}} / (k_{\text{LiF}} A_{\text{LiF}}) + d_{\text{Cathode}} / (k_{\text{Cathode}} A_{\text{Cathode}})} \quad (4)$$

从上述公式可以看到，增加各个功能层热传导率，都将会提高器件散热效果。但是有机材料的热传导率都比较低，所以仿真只考虑了基板、阳极、阴极的热传导率对器件温度分布的影响。基板的热传导率对器件温度分布最明显，主要是因为基板的厚度  $d_{\text{Substrate}}$  较大，比阴极和阳极的厚度多出 4 个数量级。

### 2.2 功能层厚度对热学特性的影响

图 6 是阴极厚度和器件温度的变化曲线，从图中可以看出，随着器件阴极厚度的增加，器件温度减小，但是增加阴极厚度对温度下降作用比较小，这主要是因为在对流换热系数不高的情况下，辐射换热是主要的换热方式，玻璃基板表面发射率远大于阴极 Al 的发射率，而且基板面积远大于阴极面积，所以玻璃基板侧的散热量远大于阴极侧；所以改变阴极的厚度对散热的影响效果比较局限。

OLED 是发光器件，发光机理是电子和空穴在外电场的作用下注入、迁移、复合而发出光，并伴随着热的产生<sup>[14-15]</sup>。有机层的厚度和器件注入、迁移有关，改变其厚度会影响器件的载流子注入和输运，进

而影响器件的发光效率。阳极和基板的厚度会影响器件的出光效率。所以，仿真只考虑了阴极厚度对器件温度分布的影响。

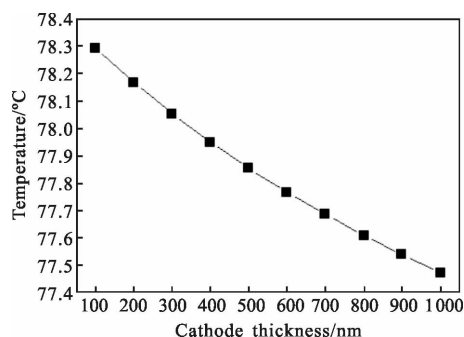
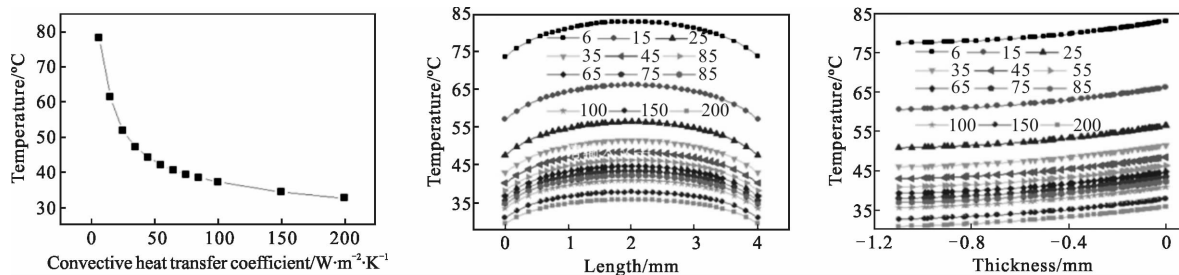


图 6 阴极厚度对器件温度的影响

Fig.6 Device temperature with different cathode thickness

### 2.3 对流换热系数对热学特性的影响

图 7 是对流换热系数和器件温度的关系曲线，从图 7(a)中可以看出，在一定范围内增大对流换热系数，器件温度急剧下降，尤其是从自然对流到强制对流的转变。从图 7(b)~(c)可以看出，对流换热系数



(a) 器件温度  
(a) Device temperature  
(b) 阴极长度方向温度分布  
(b) Temperature distribution along the cathode length  
(c) 器件厚度方向温度分布  
(c) Temperature distribution along the device thickness

图 7 对流换热系数对器件温度的影响

Fig.7 Device temperature with different convection heat transfer coefficient

增大，器件表面和内部温度都大幅度下降，但是温度梯度变化很小。根据牛顿冷却定律，OLED 对流换热由下式决定。

$$q = h(T - T_{\text{Sur}}) \quad (5)$$

式中： $q$  为单位面积上热流量； $h$  为对流换热系数； $T$  为器件表面温度； $T_{\text{Sur}}$  为环境温度，可以看出对流换热系数增加，通过对流方式散掉的热量越多，实际散热设计中经常采用加风扇，加冷却器等加快器件表面气流

速度来提高对流换热系数。

### 2.4 表面发射率对热学特性的影响

图 8 是基板表面发射率对器件温度的影响,从

图 8(a)中可以看出,随着基板表面发射率的增大,器件温度显著下降。图 8(b)~(c)是阴极表面及器件厚度方向上温度分布和基板表面发射率之间的关系,

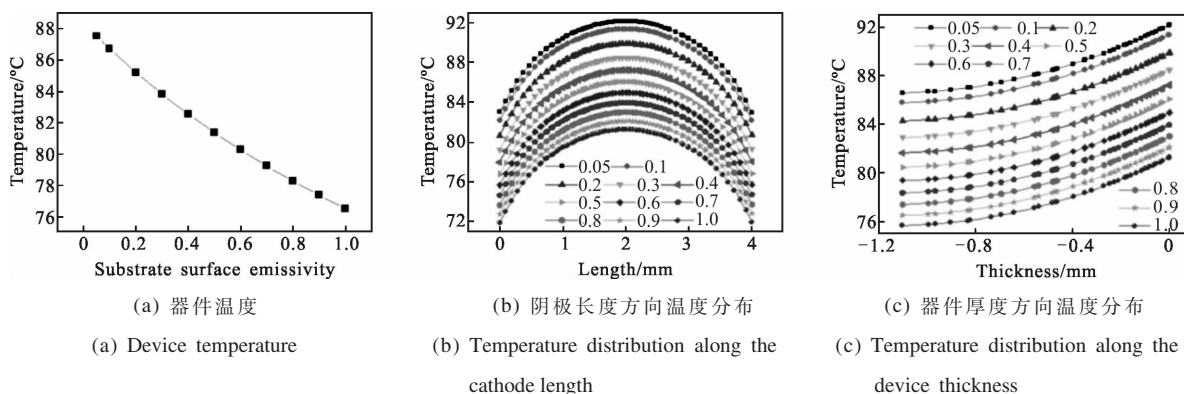


图 8 基板表面发射率对器件温度的影响

Fig.8 Device temperature with different substrate surface emissivity

可以看出,基板发射率对于器件表面和内部温度梯度影响不大。

图 9 是阴极表面发射率和器件温度的关系曲线,从图中可以看出,随着阴极表面发射率的增大,器件温度线性降低,但是整体变化甚微。根据斯忒藩-玻尔兹曼定律,OLED 表面与环境之间的净辐射换热等于:

$$\phi = \varepsilon A \sigma (T^4 - T_{Sur}^4) \quad (6)$$

式中: $\phi$  为热流量; $A$  为表面面积; $\sigma$  为玻尔兹曼常数  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ;  $\varepsilon$  为物体的发射率; $T$  为器件表面温度; $T_{Sur}$  为环境温度。从公式(6)可以看出,表面发射率增加,通过热辐射的散热越多,而且热辐射的散热和面积有很大关系,OLED 器件中基板面积远大于阴极面积,因此改变基板的表面发射率,改善散热效果明显,而改变阴极的表面发射率,其散热改善的效果不大。实际散热设计中可以采用形成粗糙表面或者喷涂辐射散热涂料来提高物体的表面发射率。

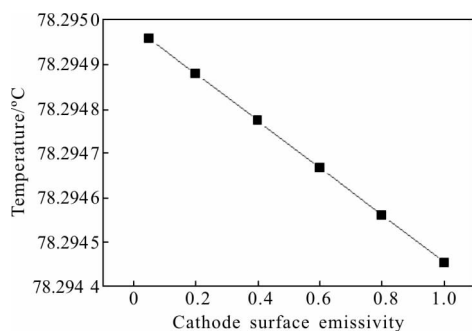


图 9 阴极表面发射率对器件温度的影响

Fig.9 Device temperatures with different cathode surface emissivity

### 3 结论

采用有限元方法对未封装 OLED 器件进行了热仿真研究,研究结果发现,OLED 表面及器件内部存在明显的温度梯度,最高温度出现在发光层靠近阴极层,基板热传导系数和温度梯度密切相关。功能层的热传导系数、阴极厚度、表面特性等因素会影响器件温度分布。其中对流换热系数对器件温度影响最大。

在实际应用中,OLED 器件一般需要封装来抵御水氧对器件的侵蚀,所以在封装器件中,封装材料的热传导率及表面发射率对器件温度影响较大,原理和基板热传导率及表面发射率对器件温度影响相同。所以在器件散热方面,应根据器件传热特性,结合使用场合及周围环境进行设计以提高器件的发光效率与稳定性。具体考量因素包括,基板及封装材料热传导率,气流速度、表面发射率等。研究结果有助于改善器件的热学性能,为器件的散热设计提供了参考。

### 参考文献:

[1] Cheng Yu. Process in display technologies and their application[J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(1): 31-36.  
 [2] Guan Yunxia, Chen Lijia, Chen Ping, et al. Organic light-emitting device based on LSMO [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2105-2109. (in Chinese)  
 关云霞, 陈丽佳, 陈平, 等. 磁性电极作为衬底的有机电致发光器件[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2105-2109.

- [3] Boroumand F A, Hammiche A, Hill G, et al. Characterizing joule heating in polymer light-emitting diodes using a scanning thermal microscope [J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(3): 252–256.
- [4] Gärditz C, Winnacker A, Schindler F, et al. Impact of Joule heating on the brightness homogeneity of organic light emitting devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(10): 1585.
- [5] Kim J, Hong H L. Wave formation by heating in thin metal film on an elastomer[J]. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*, 2010, 39(11): 1122–1128.
- [6] Zhou X, He J, Liao L S, et al. Real-time observation of temperature rise and thermal breakdown processes in organic LEDs using an IR imaging and analysis system[J]. *Advanced Materials*, 2000, 12(4): 265–269.
- [7] Savvateev V N, Yakimov A V, Davidov D, et al. Degradation of nonencapsulated polymer-based light-emitting diodes: Noise and morphology [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(23): 3344–3346.
- [8] Sturm J C, Wilson W, Iodice M. Thermal effects and scaling in organic light-emitting flat-panel displays [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics IEEE Journal of*, 1998, 4 (1): 75–82.
- [9] Park J, Ham H, Park C. Heat transfer property of thin-film encapsulation for OLEDs [J]. *Organic Electronics*, 2011, 12 (2): 227–233.
- [10] Bergemann K J, Krasny R, Forrest S R. Thermal properties of organic light-emitting diodes [J]. *Organic Electronics*, 2012, 13(9): 1565–1568.
- [11] Yang Lianqiao, Fu Meijuan, Wei Bin, et al. Thermal analysis and thermal design of organic light-emitting diode [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33 (6): 624–627. (in Chinese)  
杨连乔, 付美娟, 魏斌, 等. 有机发光二极管的热分析与热设计[J]. *发光学报*, 2012, 33(6): 624–627.
- [12] Li Yongtao, Song Xiaofeng, Chen Jianlong, et al. Encapsulation's thermal characteristics for organic electroluminescent devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1630–1635. (in Chinese)  
黎永涛, 宋小锋, 陈建龙, 等. 有机电致发光器件的封装热特性研究[J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1630–1635.
- [13] Zhang Wenwen, Wu Zhaoxin, Liu Yingwen, et al. Thermal analysis of organic light emitting diodes based on basic heat transfer theory [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32 (8): 139–143.
- [14] Chen Jun, Wang Qingsong. Recent progress of infrared upconversion device based on the integration of OLED [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 17–27. (in Chinese)  
陈俊, 王青松. 基于 OLED 显示单元的红外上转换器件研究进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(1): 17–27.
- [15] Zhang Wenwen, He Fengtao, Dong Jun. Development of multifunctional power supply for OLED [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1883–1888. (in Chinese)  
张稳稳, 贺锋涛, 董军. 多功能 OLED 驱动电源的设计与实现[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1883–1888.