

聚合物电致发光二极管热特性研究*

张剑平¹ 文尚胜^{1**} 邹建华¹ 胡苏军¹ 李艳虎¹ 吴宏滨^{1,2}

(¹ 华南理工大学高分子光电材料及器件研究所 ² 特种功能材料教育部重点实验室 广州 510640)

摘 要 采用 ANSYS 有限元分析软件中热分析结构单元,对聚合物电致发光二极管(PLED)在光强为 1000 cd/m² 时的热特性进行模拟,获得其温度场、热流分布及温度梯度的分布图,从仿真结果知 PLED 器件的最高温度为 45.968℃,处于 PFO-BT 发光层,最低温度为 45.95℃,处于石英玻璃基底末端.计算得出聚合物发光器件总热阻为 1305℃/W,聚合物发光层至石英玻璃基底末端热阻为 1℃/W.通过改变 PLED 器件输入功率、基底材料以及基底厚度 3 个参数,分别模拟得出其对 PLED 器件热特性的影响,仿真结果表明器件最高温度 T_H 与输入功率 P 显现良好的线性关系;不同基底材料对器件温度影响小,负极端为器件主要散热途径;当基底厚度不断增加时,PLED 器件最高温度随着增加,而最低温度不断减少,器件总热阻基本不变,发光层至石英基底末端热阻线性增大.

关键词 聚合物电致发光二极管, 功率, ANSYS 热特性

自从 1987 年美国 Kodak 公司的 Tang 和 van Slyke 等^[1]首次制成了双层有机薄膜发光二极管,实现了低压直流驱动的固体发光器件以来,有机电致发光二极管(organic light-emitting diode, OLED)由于具有超薄、重量轻、成本低、能耗低、主动发光、视角宽、响应速度快等优点,在显示和照明领域有着极大的应用前景,受到学术界和产业界的极大重视^[2-5].虽然近年来有机电致发光二极管的效率在不断提高^[6-9],然而,由于 OLED 器件的固有电阻特性使器件在工作时内部产生大量焦耳热,输入功率仅有小部分可以转换成光能,其它大部分能量将以串联电阻和晶格振动方式转变成热量^[10-13];随着热量产生,温度的升高,这不仅会因为热应力作用破坏 OLED 器件结构^[11],还会随着温度升高加速 OLED 发光层老化^[12],导致 OLED 器件寿命普遍较短,这严重制约了 OLED 产业化进程.另一方面,与基于真空蒸镀技术的小分子发光器件(OLED)相比,基于聚合物材料的聚合物发光二极管(PLED)除了有 OLED 优点外,还兼有良好的机械加工特性,可以采用湿法处理,能精确控制共混比例和掺杂浓度,可以用旋涂或喷墨打印方法成膜,工艺简单,还具有易于大面积成膜和成本低等优点^[14],有助于进一步降低制造成本,实现商业化生产.然而,国内外关于 PLED

的热特性少有报道^[15,16].对 PLED 器件的热特性进行研究,有助于了解器件失效过程,优化器件结构,改善器件稳定性,提高器件寿命,改进器件的性能.

ANSYS 有限元分析软件的热学分析模块能够计算热传导、热对流以及热辐射 3 种热传递方式的传热问题,并可以对这些基本传热问题进行稳态、瞬态、线性和非线性分析,这使得 ANSYS 成为有限元热分析模拟最为常用的软件.因此,本文采用 ANSYS 有限元分析软件对基于聚合物的结构为 ITO/PEDOT/PFO-BT/Ba/Al 的 PLED 器件热特性进行模拟,分析了不同输入功率,不同基片衬底,以及不同衬底厚度下发光器件热特性,为 PLED 器件优化设计提供了一定参考价值.

1 有机电致发光二极管热模拟

本工作对实验室常用 PLED 器件结构进行模拟,器件结构为石英玻璃片(0.7 mm)/ITO(125 nm)/PEDOT(40 nm)/PFO-BT(80 nm)/Ba(4 nm)/Al(80 nm),器件制作方法见文献[7],器件结构如图 1 所示.

PLED 器件各层厚度和导热系数如表 1 所示,PLED 各层厚度由台阶仪(Tencor Alfa-Step 500)测得、石英玻璃厚度由游标卡尺测得,导热

* 2010-04-09 收稿,2010-06-17 修稿;广东省科技计划项目(项目号 2005B50101005、2007A010500011)资助;** 通讯联系人,E-mail: wss64@163.com

doi:10.3724/SP.J.1105.2010.10106

Table 1 Thickness and thermal conductivity of PLED device

Layer	Quartz glass substrate	ITO	PEDOT	PFO-BT	Ba	Al
Thickness (nm)	700000	125	40	80	4	80
Thermal conductivity R ($W/(m \cdot K)$)	20	20	0.12	0.12	18.4	237

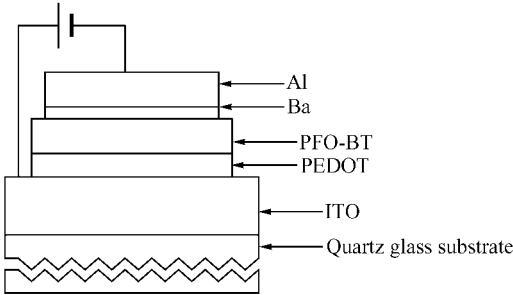


Fig. 1 Schematic diagram of PLED device' structure
Note: PFO-BT is the abbreviation of 9,9-dioctylfluorene-*co*-2,1,3-benzothiadiazole; PEDOT is the abbreviation of poly-(3,4-ethylene dioxythiophene)

系数由热学手册查阅所得^[8]. 空气与铝电极自然对流换热系数为 $25\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, 空气与石英玻璃基底自然对流换热系数为 $25\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ^[9].

实验室中制备 PLED 器件性能参数如图 2 所示,其有效发光面积 A 为 $1.7 \times 10^{-5}\text{ m}^2$,则发光层 PFO-BT 的发光体积 V 为 $1.36 \times 10^{-12}\text{ m}^3$;当 PLED 器件亮度为 $1000\text{ cd}/\text{m}^2$ 时,器件的电压为 7.7 V ,电流为 2.6 mA ,输入功率为 $20 \times 10^{-3}\text{ W}$,能量转变效率为 0.6% ,则热生成功率 P 为 $19.9 \times 10^{-3}\text{ W}$,单位体积热产生率 $Q = P/V = 14.6 \times 10^9\text{ W}/\text{m}^3$.

实验模拟采用 ANSYS 有限元软件中 thermal 模块,选择 Thermal Solid Quad 4node 55 作为热分析结构单元. 由于 PLED 器件为面发射,对厚度方向热分布研究才有意义,故本文取 PLED 器件厚度方向进行热模拟,仿真模型如图 3.

在划分有限元单元基础上采用静态方式模拟,在铝电极一端施加对流换热系数 h_1 为 $25\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$,空气温度为 20°C 的载荷;在石英玻璃片一端施加对流换热系数 h_2 为 $20\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$,空气温度为 20°C 的载荷;在 PFO-BT 发光层施加大小为 $14.6 \times 10^9\text{ W}/\text{m}^3$ 热生成率载荷. 按照上述模型和载荷进行有限元求解,求得 PLED 器件最高温度处于 PFO-BT 发光层,大小为 $T_j = 45.968^\circ\text{C}$;最低温度处于石英玻璃片基底末端,大小为 $T_s = 45.95^\circ\text{C}$;如图 4 所示.

PLED 器件最高温度为 45.968°C ,空气温度

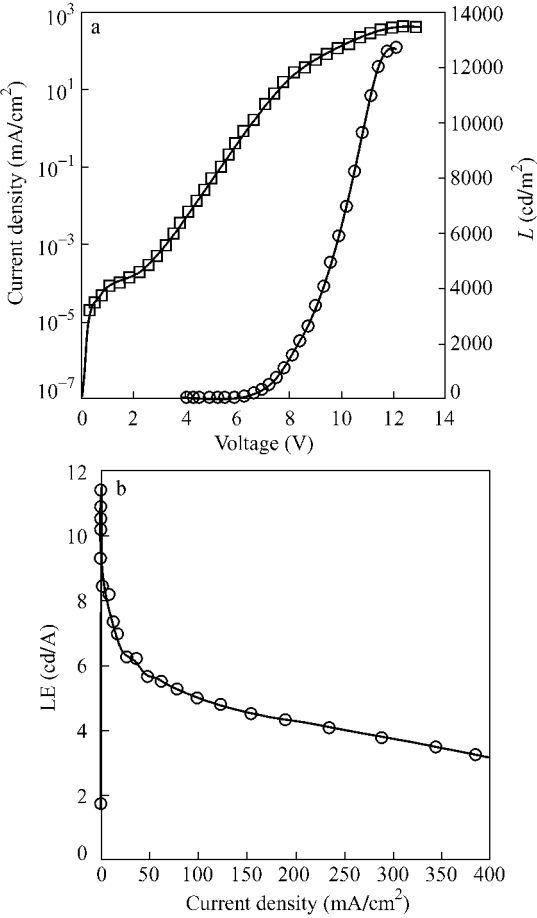


Fig. 2 Current density or light intensity (L) versus voltage (V) curves (a) and light-emitting (LE) versus current density (b) of PFO-BT

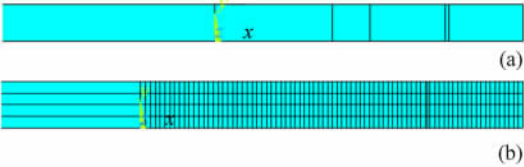


Fig. 3 One direction model (a) and the finite element (b) of PLED device
From left to right: Substrate→ITO→PEDOT→PFO-BT→Ba→Al

为 20°C ,因此可以由式(1)得出 PLED 器件的总热阻为:

$$R_T = \frac{T_j - T_a}{P} = \frac{45.968^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{19.9 \times 10^{-3}\text{ W}} = 1305^\circ\text{C}/\text{W}$$

(1)

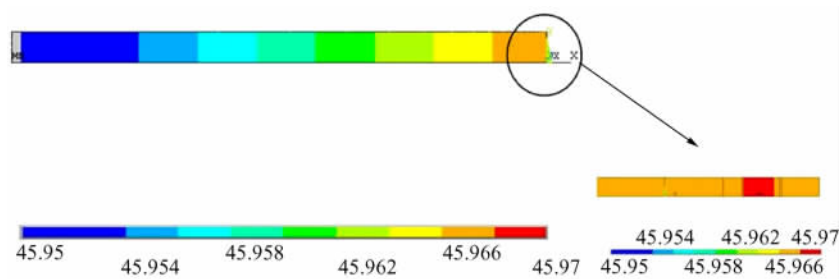


Fig. 4 Temperature distribution of PLED device

From left to right: Substrate→ITO→PEDOT→PFO-BT→Ba→Al

其中 R_T 为 PLED 器件的总热阻, T_j 为 PFO-BT 发光层的温度, T_a 为空气温度, P 为 PLED 器件热生成功率。

PLED 器件总热阻高由以下因素所造成: (1) 本模拟是对实验室制备 PLED 器件的散热情况进行实际模拟, 即铝电极、石英玻璃与空气之间对流为自然对流, 并未采用外部强加对流; (2) PLED 器件光能转变效率低, 仅有 0.6%, 几乎所有的输入功率均转变成热量, 造成 PFO-BT 发光层温度高; (3) PLED 器件发光层、空穴传输层为有机聚合物, 导热系数低。

PLED 器件发光层至石英玻璃片基底末端热阻为可以由式子 (2) 得出:

$$R_{js} = \frac{T_j - T_s}{P} = \frac{45.968^\circ\text{C} - 45.95^\circ\text{C}}{19.9 \times 10^{-3} \text{ W}} = 1^\circ\text{C/W} \quad (2)$$

其中 R_{js} 为 PFO-BT 至石英玻璃片基底末端热阻, T_j 为 PFO-BT 发光层的温度, T_s 为石英玻璃基底末端的温度, P 为 PLED 器件热生成功率。热阻 R_{js} 数值小主要源于 PLED 器件厚度薄, 各层间温差小。

PLED 器件热流分布、温度梯度如图 5 所示。

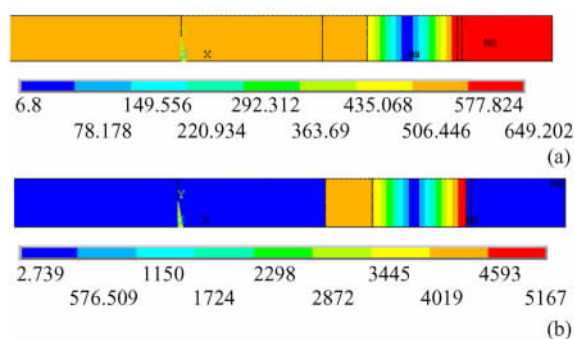


Fig. 5 Flux distribution (a) and thermal gradient (b) of PLED device

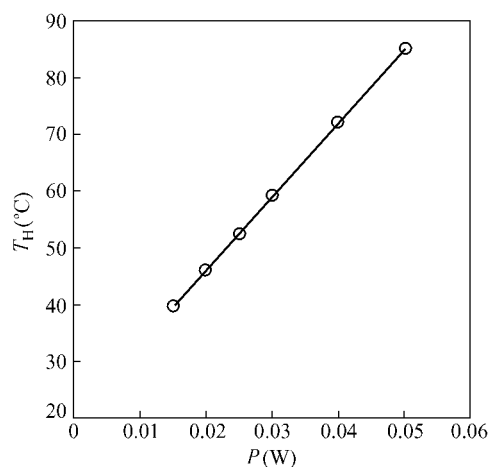
From left to right: Substrate→ITO→PEDOT→PFO-BT→Ba→Al

由图 5 热流分布示意图可以看出, PFO-BT 发

光层热流量小, 大部分热流由铝电极散发出去, 小部分热流从石英玻璃基底散发出去, 因此铝电极一端为主要散热途径, PLED 器件散热研究应注重于金属电极散热, 目前在铝电极焊接高导热热沉是电子元器件最为常用散热手段。从图 4 热梯度示意图可以看出, PLED 器件温度变化较大的区域为 PFO-BT 发光层与阴极 Ba/Al 之间界面, 其次为 PEDOT 空穴传输层, 而石英玻璃层、ITO 溅射层、PFO-BT 发光层中心和铝电极层温度变化相对较小; 温度变化大, 界面会产生较大热应力, 热应力产生容易破坏 PLED 器件结构。

2 不同输入功率 PLED 热模拟

PLED 器件实际应用中, 可以通过增大 PLED 器件输入功率 P 来提高器件的亮度, 然而输入功率不能超过 PLED 器件的额定功率, 否则器件会因为散热不及时, 产生高温破坏器件的物理结构^[12], 造成永久性失效。鉴于输入功率重要性, 本文对不同输入功率下 PLED 器件热特性进行仿真, 实验结果绘制成图 6, 如下所示。

Fig. 6 Relation between the highest temperature T_H and input power P of PLED device

从仿真结构分析知,PLED 器件最高温度均处于 PFO-BT 有源层,并与输入功率 P 呈现良好的线性关系,当输入功率 P 为 $15 \times 10^{-3} \text{ W}$ 时,器件最高温度 T_{H} 为 39.48°C ;当输入功率为 $50 \times 10^{-3} \text{ W}$ 时,器件的最高温度 T_{H} 为 84.92°C . 上述功率仿真针对的是实验室制备 PLED 器件裸片,实际应用中还须考虑 PLED 器件封装引入的热阻,而封装引入热阻将会大幅提高 PLED 器件有源层的温度,引起器件寿命变化,因此 PLED 器件应用中必须明确所 PLED 器件的最高输入功率 P 值.

3 不同基底材料 PLED 热模拟

在发光器件制备中常用基底材料有石英玻璃

和硼硅酸玻璃,本文对这两种常用材料分别作为基底对 PLED 器件热特性的影响进行模拟,结合上述实验与计算过程,得到结果如表 2 所示

由表 2 数据可以看出,当采用低热导材料硼硅酸玻璃作为 PLED 器件基底时,最高温度仍处于 PFO-BT 发光层,大小为 46.101°C ;最低温度处于硼硅酸玻璃末端,大小为 45.773°C ,因而从 PFO-BT 至基底末端热阻 R_{js} 从原来石英玻璃基底的 1.0°C/W 迅速增加为 16.6°C/W ;总热阻由 1305°C/W 增加至 1312°C/W . 与石英玻璃基底相比,采用硼硅酸玻璃片作为基底时 PFO-BT 发光层温度仅稍微升高,总热阻变化小,但可以有效地降低 PLED 器件制备成本,有利于产业化生产.

Table 2 Thermal characteristics of PLED device according to different substrate materials

Substrate material	Thermal conductivity, $R(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	Maximum temperature, $T_{\text{H}}(^{\circ}\text{C})$	Lowest temperature, $T_{\text{L}}(^{\circ}\text{C})$	Thermal resistance $R_{\text{js}}(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	Thermal resistance, $R_{\text{T}}(^{\circ}\text{C}/\text{W})$
Quartz glass	20	45.97	45.95	1.0	1305
Borosilicate glass	1.1	46.10	45.77	16.6	1312

采用硼硅酸玻璃片作为基底材料时,PLED 器件温度、热流分布如图 7 所示.

对比图 4、图 7 可以看出采用硼硅酸玻璃片

作为 PLED 器件基底材料时,依靠铝电极散发热量更多,而依靠基底散发热量相应减少;PFO-BT 中心热流量有所增加.

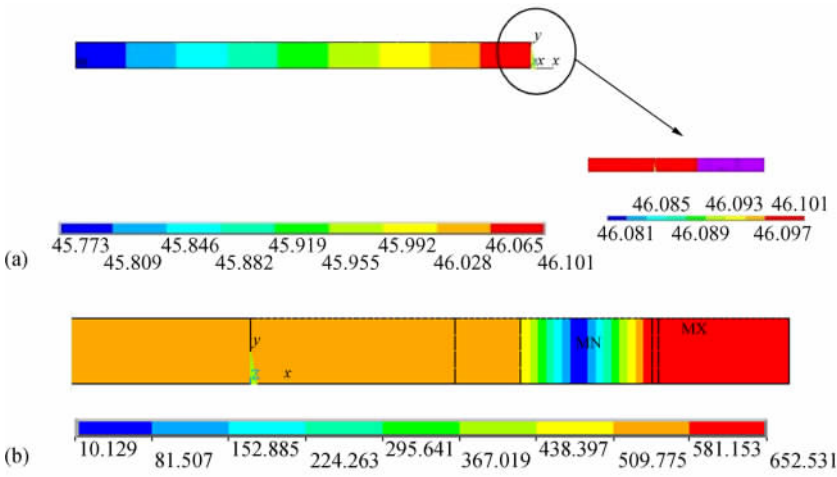


Fig. 7 Thermal distribution (a) and flux distribution (b) of PLED device when using borosilicate glass

From left to right: Substrate→ITO→PEDOT→PFO-BT→Ba→Al

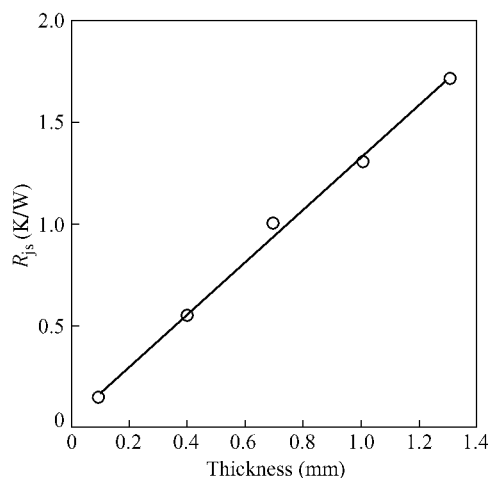
4 不同基底厚度 PLED 热模拟

为了进一步研究 PLED 器件热特性,我们对在相同功率下,不同厚度的石英基底 PLED 器件的发光层温度的变化情况分别进行模拟,模型输入热功率为 $19.9 \times 10^{-3} \text{ W}$,热产生率 $Q = P/V = 14.6 \times 10^9 \text{ W/m}^3$,实验结果如表 3 所示.

从表 3 可以看出,随着 PLED 基底厚度不断增大,发光层 PFO-BT 至石英玻璃片基底末端热阻 R_{js} 线性增大,如图 8 所示;虽然 R_{js} 线性增大,PLED 器件总热阻基本保持不变,实验结论符合 2 节中所提到观点,铝电极一端为主要散热通道,PLED 器件散热研究应注重于金属电极散热.

Table 3 Thermal characteristics of PLED device according to different thickness of substrate

Thickness (mm)	Maximum temperature, T_H (°C)	Lowest temperature, T_L (°C)	Thermal resistance, R_{js} (°C/W)	Thermal resistance, R_T (°C/W)
0.1	45.957	45.954	0.15	1304
0.4	45.964	45.953	0.55	1305
0.7	45.968	45.95	1	1305
1.0	45.953	45.927	1.31	1304
1.3	45.967	45.933	1.71	1305

Fig. 8 Relation between thickness of substrate and thermal resistance R_{js}

5 结论

采用 ANSYS 有限元分析软件研究了结构为石英玻璃片/ITO/PEDOT/PFO-BT/Ba/Al 的单层发光 PLED 器件的热特性. 通过改变 PLED 器件不同输入功率, 分析器件温度变化, 得到 PLED 器件最高温度 T_H 均处于 PFO-BT 有源层, 并且最高温度 T_H 与输入功率 P 呈现良好的线性关系. 另外, 比较了石英玻璃和硼硅酸玻璃 2 种不同基底材料对 PLED 器件热特性的影响, 两者最高温度、总热阻差别小, 从成本角度考虑, 硼硅酸玻璃更合适产业化需求. 最后, 当改变石英基底厚度时, 发光层至基底端热阻 R_{js} 随石英基底的厚度增加而线性增加, 但 PLED 器件总热阻 $R_{总}$ 保持不变, 原因在于 PLED 器件铝电极一端为主要散热通道, 所以, PLED 金属电极散热性能对器件稳定性、寿命提高等至关重要.

REFERENCES

- 1 Tang C W, van Slyke S A. Appl Phys Lett, 1987, (51): 913 ~ 915
- 2 Wang L, Liang B, Huang F, Peng J B, Cao Y. Appl Phys Lett, 2006, (89): 15115-1 ~ 3
- 3 Liu Zhitian (刘治田), Zou Jianhua (邹建华), Chen Junwu (陈军武), Liu Yongqiang (刘永强), Peng Junbiao (彭俊彪), Cao Yong (曹镛). Acta Polymerica Sinica (高分子学报), 2009, (9): 845 ~ 851
- 4 D' Andrade B, Brown J J. SPIE, 2006, 6225: 22514 ~ 22514
- 5 Blassing J, Hunze A, Scheffel M, Stossel M, Heuser K, Wittmann G, Worle J, Winnacker A. Appl Phys Lett, 2001, 78: 3905 ~ 3907
- 6 Huang J S, Li G, Wu E, Xu Q F, Yang Y. Adv Mater, 2006, 18: 114 ~ 117
- 7 Wang Baozheng (王保争), Zhang Anqi (张安琪), Wu Hongbing (吴宏滨), Yang Wei (杨伟), Wen Shangsheng (文尚胜). Acta Physica Sinica (物理学报), 2009, 59: 286 ~ 290
- 8 Wu H B, Zhou G J, Zou J H, Ho C, Wong W Y, Yang W, Peng J B, Cao Y. Adv Mater, 2009, 21: 1 ~ 4
- 9 Huang F, Shih P I, Shu C F, Chi Y, Jen A K Y. Adv Mater, 2009, 21: 361 ~ 365
- 10 Xue Yuan (薛媛), Wang Xiaoli (王小力), Wu Chaoxin (吴朝新), Hou Xun (侯洵). Journal of Xi'an Jiaotong University (西安交通大学学报), 2009, (4): 70 ~ 74
- 11 Zhou Meijuan (周美娟), Zhong Gaoyu (钟高余), He Jun (何钧), Liao Liangsheng (廖良生), Hou Xiaoyuan (侯晓远). Chinese Journal of Semiconductors (半导体学报), 2001, (8): 1048 ~ 1051
- 12 Zhou X, He J, Liao L S, Lu M, Ding X M, Hou X Y, Zhang X M. Adv Mater, 2000, 12: 265 ~ 269
- 13 Gärditz C, Winnacker A, Schindler F, Paetzold R. Appl Phys Lett, 2007, 90: 103506-1 ~ 3
- 14 Burroughes J H, Bradley D C, Brown A R, Marks R N, Mackay K, Friend R H, Holmes A B. Nature, 1990, 347: 539 ~ 541
- 15 Tessler N, Harrison N T, Thomas D S, Friend R H. Appl Phys Lett, 1998, 73: 732 ~ 734
- 16 Xu Zheng (徐正), Liao Liangsheng (廖良生), Lee Zhensheng (李振声), Lee Shuitong (李述汤). Chinese Journal of Luminescence (发光学报), 2009, (4): 70 ~ 74

- 报),2000,21:247 ~ 252
- 17 Zou Jianhua(邹建华),Tao Hong(陶洪),Wu Hongbin(吴宏滨),Peng Junbiao(彭俊彪). Acta Physica Sinica(物理学报),2009,58:1224 ~ 1228
- 18 Mark James E. Polymer Data Handbook. England: Oxford University,1999. 804 ~ 805
- 19 Zhang Xuexue(张学学),Li Guifu(李桂馥). Thermal Engineering(热工基础). Beijing(北京): Higher Education Press(高等教育出版社),2000. 181 ~ 182

SIMULATION OF THERMAL PROPERTIES FOR POLYMER LIGHT-EMITTING DIODES

ZHANG Jianping¹, WEN Shangsheng¹, ZOU Jianhua¹, HU Sujun¹, LI Yanhu¹, WU Hongbin^{1,2}

(¹ Institute of Polymer Optoelectronic Material and Devices,

² Key Laboratory of Specially Functional Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract The thermal properties of polymer light-emitting diode (PLED) was simulated with the light intensity of 1000 cd/m² by using the thermal structure element in ANSYS finite element analysis software. Temperature distribution, thermal flow distribution and thermal gradient distribution were obtained, the simulation results show that the maximum temperature is in 9,9-dioctylfluorene-co-2,1,3-benzothiadiazole (PFO-BT) emitting layer of the PLED device, with temperature of 45.968℃, the minimum temperature is at the end of the quartz glass substrate, about 45.95℃; the total thermal resistance is 1305℃/W, but the thermal resistance between polymer light-emitting layer and the end of the quartz glass substrate is only 1℃/W. The thermal properties of PLED devices according to different input powers, substrate materials and substrate thickness were compared. The simulation results indicates that the maximum temperature T_H and the device input power P show a good linear relationship; the highest temperature of the PLED device changes slightly with changing quartz glass substrate to borosilicate glass substrate, the cathode side is the main route for heat dissipation; when the substrate thickness increases continuously, the maximum temperature T_H increases at the same time, however the minimum temperature T_L of PLED device decreases, the total thermal resistance of the PLED device is essentially the same, the thermal resistance between light-emitting layer and the end of quartz glass substrate rises linearly. These results provide a basis for the optimization of PLED devices.

Keywords Polymer light-emitting diode, ANSYS, Power, Substrate, Thermal characteristics