

功率型倒装结构 LED 系统热模拟及热阻分析

王立彬[†] 刘志强 陈宇 伊晓燕 马龙 潘领峰 王良臣

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 为了解功率型倒装结构 LED 系统各部分热阻, 找出 LED 系统散热关键, 对功率型倒装结构 LED 系统进行了有限元热模拟, 同时结合传热学基本原理分析了各部分的热阻. 结果表明, LED 系统中凸点, Si-submount 管壳和散热体的自身热阻较小, 而芯片、粘结剂、散热体-环境的热阻较大, 占系统热阻主要部分. 因此优化设计芯片与散热体, 选取导热率高的粘结剂, 可以有效降低 LED 系统的热阻, 成为 LED 系统散热设计的关键.

关键词: GaN; LED; 热模拟; 热阻; 有限元

PACC: 4280L; 4225B; 7280E

中图分类号: TN312⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0504-05

1 引言

与传统的白炽灯相比, 白光 LED 具有节能、环保、发光效率高、显色指数高、响应速度快、体积小和工作寿命长等突出优点, 被视为新一代的照明光源, 成为近年来的研究热点^[1-3]. 欧美日韩等国家和地区都制定了相应的发展计划, 投入巨资进行相关技术研究. 我国也于 2003 年启动了“国家半导体照明工程”.

GaN 基功率型倒装结构 LED 是目前研究热点. 由于其产生的热量很大, 如果 LED 至环境的总热阻过高, 就会造成芯片结温过高, 过高的结温将引起器件光衰, 降低使用寿命, 甚至直接造成器件损坏^[4-6]. 因此, 降低热阻是功率型倒装结构 LED 的关键技术之一.

本文对功率型倒装结构 LED 系统及构成系统的各部分进行了有限元三维模拟, 并对模拟结果进行了分析, 指出了系统中各组成部分热阻大小, 确定了降低 LED 系统热阻的主要有效途径.

2 热模拟

功率型 LED 模型如图 1 所示, 芯片尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$. 利用有限元模拟分析方法对倒装结构的 LED 进行热场模拟, 设芯片产热功率为 1W , 由于封装用的环氧树脂热导率只有 $0.2\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 在这里作绝热处理, 热量通过传导由芯片到管壳和散热体, 最终通过对流、辐射或热传导释放到环境中, 本文模拟假设最终通过对流、辐射传递至环境

中. 其中各接触界面设为理想接触界面, 即不考虑界面热阻. 模拟软件为 ANSYS10, 三维模拟.

倒装结构的 LED 芯片与 Si-submount 通过凸点连接, 如图 2 所示. 在模拟中, 凸点的分布如图 3 所示. 管壳采用 $\pi \times 0.3^2\text{cm}^2 \times 0.1\text{cm}$ 铝制圆柱体材料, 散热体采用 $\pi \times 1.6^2\text{cm}^2 \times 0.45\text{cm}$ 铜质圆柱体材料. 边界条件为: 与空气对流系数设为 5, 散热体黑度为 0.5, 环境温度为 25°C .

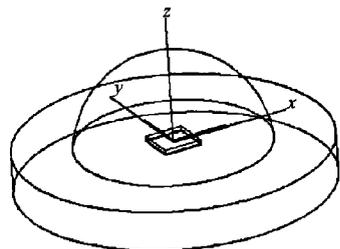


图 1 功率型 LED 模型图

Fig. 1 Model of high power LED

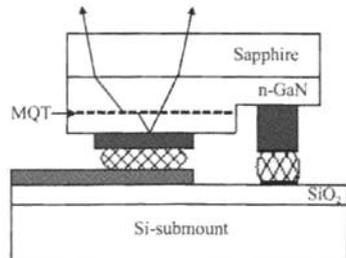


图 2 倒装结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of the flip-chip LED

[†] 通信作者. Email: lbwang@red.semi.ac.cn

2006-12-15 收到, 2007-01-04 定稿

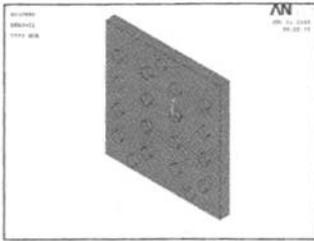


图3 凸点在芯片上分布
Fig.3 Distribution of bumps on chip

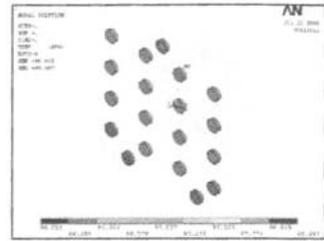


图6 凸点温度场分布
Fig.6 Temperature field of bumps

模拟结果如图4~10所示,图4为整个LED系统的温度场分布,图5~10为各个部分的温度场分布.由于凸点与两侧的部分面积差异很大,与之接触部分温度分布并不均匀.

对于实际应用中的LED系统而言,其总热阻为:

$$R_{总} = R_{芯片} + R_{凸点} + R_{Si-submount} + R_{热粘剂} + R_{case} + R_{热沉-环境}$$

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi}$$

其中 Φ 为热流量,此处为1W; ΔT 为温度差; R 为热阻.

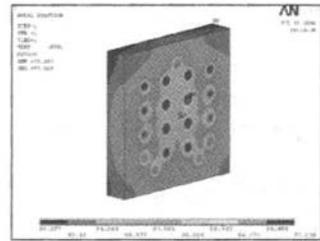


图7 Si-submount 温度场分布
Fig.7 Temperature field of Si-submount

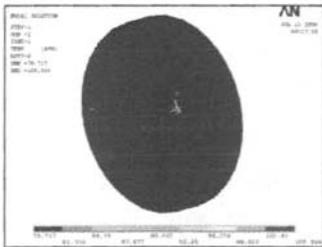


图4 LED系统温度场分布
Fig.4 Temperature field of LED system

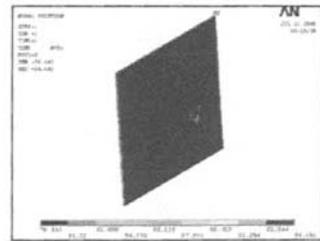


图8 导热脂温度场分布
Fig.8 Temperature field of adhesive

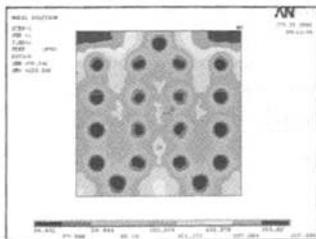


图5 有源区温度场分布
Fig.5 Temperature field of active region

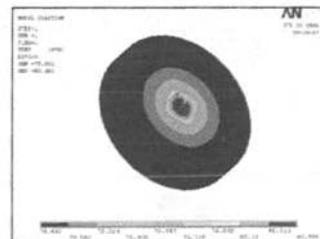


图9 管壳温度场分布
Fig.9 Temperature field of case

由于各层的温度场分布并不均匀,相邻部分的温度会有重叠部分,各层 ΔT 采用该层最高温度与

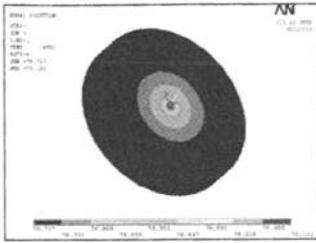


图 10 散热体温度场分布
Fig. 10 Temperature field of heat-sink

下一层最高温度之差. 表 1 为根据模拟结果计算的各部分温差与热阻. 各图放大倍数不尽相同.

3 芯片-散热体热阻

从表 1 中可以看出, 总热阻为 $80.596^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 散热体-环境的热阻为 $53.717^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 占了大部分, 芯片-散热体的热阻为 $26.879^{\circ}\text{C}/\text{W}$. 芯片至散热体部分凸点, Si-submount, 管壳和散热体的热阻很小; 而芯片和粘结剂部分热阻相对较大.

对于热传导:

$$R = \frac{d}{Ak}$$

其中 A 为传热面积; d 为传热距离; k 为材料热导率^[7].

显然, 热导率越高热阻越低, 传热面积越大传热距离越小, 即材料厚度越小热阻越低.

表 1 各部分温差、热阻与对应的材料及其热导率

Table 1 Thermal resistance, thermal conductivity, difference in temperature of different parts of LED system

	温差/ $^{\circ}\text{C}$	热阻/ $(^{\circ}\text{C}/\text{W})$	材料	热导率/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$
芯片	7.329	7.329	GaN	200
凸点	1.249	1.249	Au	317
Si-submount	2.377	2.377	Si	145
粘结剂	14.149	14.149	导热脂	1
管壳	1.362	1.362	Al	240
散热体	0.414	0.414	Cu	401
散热体-环境	53.717	53.717		
芯片-散热体	26.879	26.879		
总热阻	80.596	80.596		

根据公式计算热阻:

凸点的热阻(假设每个凸点的热流量相同): $R = 20 \times 10^{-6} / (\pi(40 \times 10^{-6})^2 \times 317 \times 19) = 0.66^{\circ}\text{C}/\text{W}$

Si-submount 的热阻: $R = 200 \times 10^{-6} / ((1.2 \times 10^{-3})^2 \times 145) = 0.96^{\circ}\text{C}/\text{W}$

管壳的热阻: $R = 1 \times 10^{-3} / (\pi(0.003)^2 \times 240) = 0.44^{\circ}\text{C}/\text{W}$

计算结果比模拟结果小, 这主要由于计算简化为一维热传导所致, 由于相邻部分的面积差别很大, 模拟中是三维热传导所致. 总体来说, 由于凸点, Si-submount 其热导率高, 材料厚度很小, 其热阻很小; 而管壳厚度较大, 但其传热面积比较而言大很多, 所以其热阻很小, 散热体也如此.

粘结剂模拟中采用的是导热脂, 其热阻为:

$$R = 20 \times 10^{-6} / ((1.2 \times 10^{-3})^2 \times 1) = 13.8^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

与模拟结果很接近, 这主要由于导热脂与 Si-submount 面积相同, 并且其厚度很小, 十分接近一维热传导, 这从热模拟图中也可以看出. 其热阻较大, 主要是热导率十分小, 只有 $1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. 因此, 改换热导率更高的粘结剂可以有效降低其热阻. 目前, 采用金属化粘结剂代替传统的导热脂逐渐成为主流, 其中金属共晶焊优势明显, 成为各 LED 封装厂家的技术新宠, 如 $\text{Au}_{20}\text{Sn}_{80}$ 热导率达到 $57\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$. 其热阻为:

$$R = 20 \times 10^{-6} / ((1.2 \times 10^{-3})^2 \times 57) = 0.242^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

因此, 金属共晶焊可以有效降低器件热阻.

芯片的热阻较大, 由于芯片中的热量必须经由凸点向外传导, 对每个凸点而言, 与之接触的芯片存在一个特定的区域, 在这个区域产生的热量将全部传导至该凸点, 并经由该凸点向外传导. 因此每个凸点所拥有的这个特定区域越大, 芯片的热阻也就越大. 图 11 为不同的凸点半径及其拥有的这个特定区域距离凸点的最大距离, 至凸点边缘对应的温差, 该温差略小于芯片最大温差. 最大温差与芯片的热阻关系如表 1 所示.

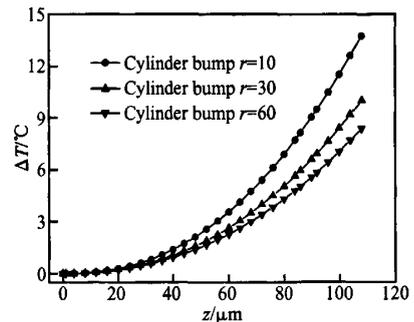


图 11 不同情况下芯片内最大温差
Fig. 11 Difference in temperature of LED chip

从图 11 中可以看出, r 越小, 对应的 ΔT 越大; r 越大, 对应的 ΔT 越小; r 一定时, 距离凸点的最

大距离越大, ΔT 越大. 从图 5 可以看出, 距离凸点最远的区域温度明显高于其他区域. 设计时应避免芯片局部区域与凸点的距离过大, 同时凸点半径可尽量大些. 因此, 凸点自身热阻虽然不大, 但凸点的大小与分布却对芯片的热阻影响很大.

4 散热体-环境热阻

散热体自身的温差很小(见表 1 与图 10), 因此, 可近似认为散热体外表面温度均匀. 散热体与环境的热交换在此处假定只有对流与热辐射, 总热流量可按下式计算^[7]:

$$\begin{aligned}\Phi &= \Phi_c + \Phi_r \\ \Phi_c &= \alpha_c (T_w - T_{am}) A \\ \Phi_r &= \epsilon C_b (T_w^4 - T_{am}^4) A\end{aligned}$$

式中 Φ_c 为对流换热量; α_c 为表面传热系数; Φ_r 为辐射换热量; ϵ 为辐射率(黑度); C_b 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, 约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A 为面积; T_w 为辐射面的绝对温度; T_{am} 为环境绝对温度. 由上式可以看出, 包含热辐射的热分析是高度非线性的.

由对流与辐射公式可以看出, 增加对流面积与辐射有效面积可以提高散热效率, 降低散热体-环境热阻. 将数值带入以上 3 个方程式, 可得

$$\begin{aligned}1 &= \Phi_c + \Phi_r \\ \Phi_c &= 5(T_w - 25) A \\ \Phi_r &= 0.5 \times 5.67 \times 10^{-8} (T_w^4 - 25^4) A\end{aligned}$$

其中 $T = T_w$, 即散热体表面温度.

得到散热体表面温度为 79.1°C , 与模拟结果接近, 计算辐射散热量为 0.44 W , 占总热量的 44% , 因此在有效热辐射面积与对流面积接近时, 辐射换热所占比例非常高.

若有效热辐射面积为对流面积的 20% 时, 辐射

散热所占比例仍然有 15% . 因此, 辐射散热在通常情况下不可忽略, 提高散热体的黑度, 能够有效提高散热体散热效率, 降低系统热阻. 散热体面积越小, 其表面温度越高, 由于热辐射换热是高度非线性的, 热辐射换热所占比例越大; 反之, 热辐射换热所占比例越小.

5 结论

通过对 LED 系统的有限元热模拟及热阻分析可知, LED 系统中凸点, Si-submount 管壳和散热体的自身热阻较小, 而芯片、粘结剂、散热体-环境的热阻较大, 占系统热阻主要部分. 因此, 优化设计芯片与散热体, 选取导热率高的粘结剂, 可以有效降低 LED 系统的热阻.

参考文献

- [1] Schubert E F. Light-emitting diodes. New York: Cambridge University Press, 2003
- [2] Steigerwald D A, Bhat J C, Collins D C, et al. Illumination with solid state lighting technology. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2002, 8: 310
- [3] Craford M G. Visible LEDs; the trend toward high-power emitters and remaining challenges for solid state lighting. Proc SPIE, 2002, 4776: 1
- [4] Sugiura L. Dislocation motion in GaN light-emitting devices and its effect on device lifetime. J Appl Phys, 1997, 81: 1633
- [5] Arik M, Petroski J, Weaver S. Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications; light emitting diodes. Proc IEEE Int Soc Con Thermal Phenomena, 2002: 113
- [6] Adachi S. Properties of group-IV, III-V and II-VI semiconductors. John Wiley & Sons, 2004
- [7] Xia Yajun. Heat transfer. Beijing: Chinese Electric Power Press, 1999 (in Chinese) [夏雅君. 传热学. 北京: 中国电力出版社, 1999]

Thermal Simulation and Analysis of High Power Flip-Chip Light-Emitting Diode System

Wang Libin[†], Liu Zhiqiang, Chen Yu, Yi Xiaoyan, Ma Long,
Pan Lingfeng, and Wang Liangchen

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: In order to reduce the thermal resistance of LED system, the thermal property of high power flip-chip light-emitting diode is simulated by ANSYS10 and analyzed. The results show that the bumps, Si-submount, case and heat-sink contribute little to the thermal resistance of LED system, but the thermal resistance of chip, adhesive and heat-sink to ambient are much larger, should be much concerned in thermal design of LED system. So optimizing the design of LED chip and heat-sink, choosing adhesive with high thermal conductivity can reduce the thermal resistance of LED system effectively.

Key words: finite element analysis; light-emitting diode; GaN; thermal simulation; flip-chip

PACC: 4280L; 4225B; 7280E

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0504-05

[†] Corresponding author. Email: lbwang@red.semi.ac.cn

Received 15 December 2006, revised manuscript received 4 January 2007