

矩形基板上 LED 芯片阵列热分析

曾海, 郭震宁, 陈俄振, 胡治伟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 分析偏心热源在矩形基板上热分布理论,利用局部模拟和理论论证的方法,获得 $m' \times n'$ 阵列中各芯片的质心温度一致的排布.利用这种排布方法,得出能求解芯片质心过余温度(CTEC)的简单关系式.同时,模拟了 4×4 , 6×6 阵列芯片的过余温度分布的情况.结果表明: $m' \times n'$ 阵列中 LED 芯片以芯片间距(a/m' , b/n')在尺寸为 $a \times b$ 的矩形基板上对称排布时,各芯片的 CTEC 都相同.

关键词: 发光二极管; 阵列芯片; 多芯片封装; 过余温度

中图分类号: O 472.3

文献标志码: A

发光二极管(LED)作为 21 世纪的新一代绿色能源,以其高效、节能、长寿命、稳定性好等优势获得广泛的应用.在 LED 的实际使用中,芯片温度的变化对光电转换效率、光通量、寿命等性能会产生巨大的影响^[1-2].对多芯片的封装系统而言,不仅要考虑各芯片的温度,还要考虑各芯片温度是否一致.因此,如何进行多 LED 芯片封装模型中的热设计成为 LED 应用中一个研究重点. Kim 等^[3]介绍了 1 个芯片、2 个芯片和 4 个芯片的热设计方案. Yovanovich 等^[4]研究了电子封装中多芯片的扩散热阻. Muzychka 等^[5-6]根据扩散热阻,获得能够预测芯片质心过余温度(CTEC)和芯片平均温度的理论.为了使各芯片温度相同,刘胜等^[7-8]设计并优化了由 3 W 和 5 W 两种不同功率封装而成的 80 W 路灯.本文利用局部模拟和理论论证的方法,对芯片阵列热分布进行研究.

1 偏心热源理论

1.1 单一热源理论

Muzychka 等^[5-6]通过分离变量法得到单一热源在基板上的过余温度.其表达式为

$$\begin{aligned} \theta(x, y, z) = & A_0 + B_0 Z + \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\lambda_m x) [A_m \cosh(\lambda_m z) + B_m \sinh(\lambda_m z)] + \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\delta_n y) [A_n \cosh(\delta_n z) + B_n \sinh(\delta_n z)] + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\lambda_m x) \cos(\delta_n y) [A_{mn} \cosh(\beta_{mn} z) + B_{mn} \sinh(\delta_{mn} z)]. \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: $\theta(x, y, z) = T(x, y, z) - T_f$ 为过余温度; $T(x, y, z)$ 为基板温度; T_f 为热沉温度;特征值 $\lambda_m = m\pi/a$; $\delta_n = n\pi/b$; $\beta_{mn} = \sqrt{\lambda_m^2 + \delta_n^2}$. 式(1)包含 1 个均匀热流解和另外 3 个热扩展解.如果热源完全覆盖热源所在平面 $z=0$,则热扩展解为 0.

在 $z=t_1$ 平面,根据相应的热边界条件,得到 Fourier 系数 B_i ,即

$$B_i = -\varphi(\zeta) A_i, \quad i = m, n, mn. \quad (2)$$

收稿日期: 2012-04-23

通信作者: 郭震宁(1958-),男,教授,主要从事光电材料与器件的研究. E-mail: znguo2003@yahoo.com.

基金项目: 福建省科技计划重点基金资助项目(2009H0034); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01338); 福建省发改委发明创造扶持基金资助项目(FC200905)

式(2)中: 扩展系数 $\varphi(\zeta)$ 为

$$\varphi(\zeta)=\frac{\zeta \sinh (\zeta t_1)+h / k_1 \cosh (\zeta t_1)}{\zeta \cosh (\zeta t_1)+h / k_1 \sinh (\zeta t_1)}, \quad(3)$$

式(3)中: ζ 分别用 λ_m, δ_n 或 β_{nm} 代替.

对 $z=0$ 平面上相应的热边界条件, 进行 Fourier 级数展开, 得到 Fourier 系数 A_m, A_n, A_{nm} , 有

$$\left.\begin{aligned} A_m &= \frac{2 Q\left[\sin \left(\frac{2 X_c+c}{2} \lambda_m\right)-\sin \left(\frac{2 X_c-c}{2} \lambda_m\right)\right]}{a b c k_1 \lambda_m^2 \varphi\left(\lambda_m\right)}, \\ A_n &= \frac{2 Q\left[\sin \left(\frac{2 Y_c+d}{2} \delta_n\right)-\sin \left(\frac{2 Y_c-d}{2} \delta_n\right)\right]}{a b d k_1 \delta_n^2 \varphi\left(\delta_n\right)}, \\ A_{nm} &= \frac{16 Q \cos \left(\lambda_m X_c\right) \sin \left(\frac{1}{2} \lambda_m c\right) \cos \left(\delta_n Y_c\right) \sin \left(\frac{1}{2} \delta_n d\right)}{a b c d k_1 \beta_{nm} \lambda_m \delta_n \varphi\left(\beta_{nm}\right)} . \end{aligned}\right\} \quad(4)$$

式(4)中: X_c, Y_c 为热源质心的坐标.

最后, 得到均匀热流解, 即

$$A_0=\frac{Q}{a b}\left(\frac{t_1}{k_1}+\frac{1}{h}\right), \quad(5)$$

$$B_0=-\frac{Q}{k_1 a b} . \quad(6)$$

1.2 多热源理论

包含多个热源的系统的过剩温度, 可由式(1)线性叠加得到. 因此, 对于有 n' 个热源的系统, 热源所在平面的过剩温度可表示为

$$\theta(x, y, 0)=\sum_{j=1}^{n'} \theta_j(x, y, 0) . \quad(7)$$

式(7)中: $\theta_j(x, y)$ 为第 j 个热源的过剩温度, 即

$$\theta_j(x, y)=A_0^j+\sum_{m=1}^{\infty} A_m^j \cos (x \lambda_m)+\sum_{n=1}^{\infty} A_n^j \cos (y \delta_n)+\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{nm}^j \cos (x \lambda_m) \cos (y \delta_n) . \quad(8)$$

由式(7)可得第 i 个热源 CTEC 的表达式, 即

$$\theta\left(X_i, Y_i, 0\right)=\sum_{j=1}^{n'} \theta_j\left(X_i, Y_i, 0\right) . \quad(9)$$

式(9)中: $\left(X_i, Y_i\right)$ 为第 i 个热源质心的坐标.

1.3 $m' \times n'$ 阵列 LED 芯片热分布理论

LED 芯片是 1 个热源. 因此, 前文关于单一热源和多热源的理论适合 LED 芯片的封装模型. $m' \times n'$ 阵列 LED 芯片封装模型, 如图 1 所示. 图 1 中: 基板长为 a , 宽为 b ; X 轴方向每行有 m' 个芯片, Y 轴方

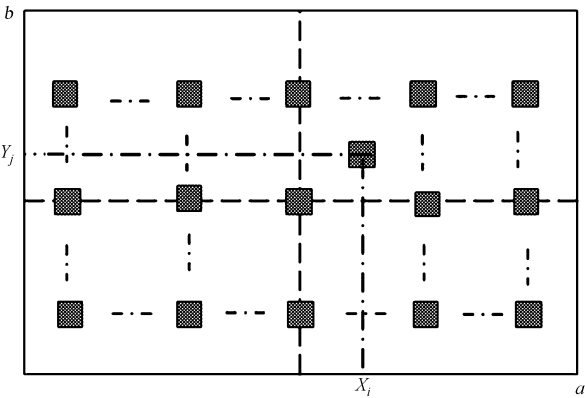


图 1 $m' \times n'$ 阵列的 LED 分布

Fig. 1 LED distribution in $m' \times n'$ array

向每列有 n' 个芯片; 芯片大小和功率都相同, 且功率用 Q 表示; (X_i, Y_j) 为第 i, j 个芯片质心坐标。

为了更直观地理解单一热源的过余温度, 将式(8)改写为

$$\theta_j(x, y) = Q_j [C_0 + \sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos(X_j \lambda_m) \cos(x \lambda_m) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(Y_j \delta_n) \cos(y \delta_n) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \cos(X_j \lambda_m) \cos(Y_j \delta_n) \cos(x \lambda_m) \cos(y \delta_n)]. \quad (10)$$

$A_0 = Q_j C_0$, $A_m^i = C_m \cos(X_j \lambda_m)$, $A_n^j = C_n \cos(Y_j \delta_n)$, $A_{mn}^i = C_{mn} \cos(X_j \lambda_m) \cos(Y_j \delta_n)$. C_0, C_m, C_n 和 C_{mn} 是与芯片位置无关的量。

由图 1, 并根据式(7), (10), 通过计算和化简, 可得到 $m' \times n'$ 阵列的 LED 芯片过余温度表达式, 即

$$\begin{aligned} \theta(x, y) = & Q \{ (m' \times n') C_0 + n' \left[\sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos(x \lambda_m) \sum_{i=1}^{m'} \cos(X_i \lambda_m) \right] + \\ & m' \left[\sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(y \delta_n) \sum_{j=1}^{n'} \cos(Y_j \delta_n) \right] + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \cos(x \lambda_m) \sum_{i=1}^{m'} \cos(X_i \lambda_m) \cos(y \delta_n) \sum_{j=1}^{n'} \cos(Y_j \delta_n) \}, \end{aligned} \quad (11)$$

则第 i, j 个的 CTEC 为

$$\begin{aligned} \theta_{i,j}(X_i, Y_j) = & Q \{ (m' \times n') C_0 + n' \left[\sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos(X_i \lambda_m) \sum_{i'=1}^{m'} \cos(X_{i'} \lambda_m) \right] + \\ & m' \left[\sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(Y_j \delta_n) \sum_{j'=1}^{n'} \cos(Y_{j'} \delta_n) \right] + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \cos(X_i \lambda_m) \sum_{i'=1}^{m'} \cos(X_{i'} \lambda_m) \cos(Y_j \delta_n) \sum_{j'=1}^{n'} \cos(Y_{j'} \delta_n) \}. \end{aligned} \quad (12)$$

2 数值模拟实验与理论论证

2.1 数值模拟实验与预测

以芯片之间的距离为变量, 建立如图 2 所示的模型. 芯片对称分布在基板上, 且芯片之间的间距相等, X 轴方向, 芯片之间的间距为 x ; Y 轴方向, 芯片之间的间距为 y . 因芯片是阵列排布, 故图 2 中只给出 X 轴方向的芯片排布。

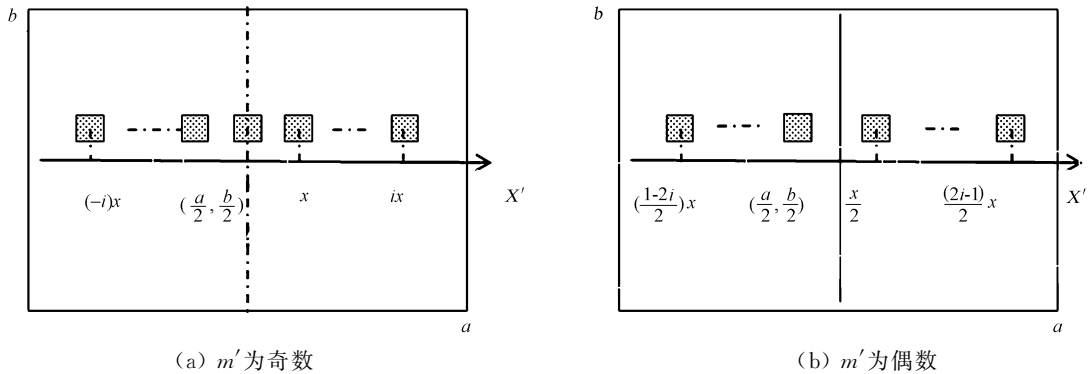


图 2 芯片的 X 坐标

Fig. 2 X coordinates of the chip

由图 2 可知道: 式(11)中 $X_i = \frac{a}{2} + ix, i=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{m'-1}{2}$, 或 $X_i = \frac{a}{2} + \frac{2i-1}{2}x, i=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{m'-1}{2}, \frac{m'}{2}$; $Y_j = \frac{b}{2} + jy, j=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{n'-1}{2}, n'$ 为奇数; $Y_j = \frac{b}{2} + \frac{2j-1}{2}y, j=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \frac{n'-2}{2}, \frac{n'}{2}, n'$ 为偶数。

把 X_i 和 Y_j 的表达式带入式(12),有

$$\cos(X_i\lambda_m)\sum_{i'=1}^{m'}\cos(X_{i'}\lambda_m)=\begin{cases}2\cos[(\frac{a}{2}+ix)\lambda_m]\cos(\frac{a}{2}\lambda_m)\times\\[\sum_{i'=1}^{\frac{m'-1}{2}}\cos(i'x\lambda_m)+\frac{1}{2}], & m' \text{ 为奇数,}\\2\cos[(\frac{a}{2}+\frac{2i-1}{2}x)\lambda_m]\cos(\frac{a}{2}\lambda_m)\times\\[\sum_{i'=1}^{\frac{m'}{2}}\cos(\frac{2i'-1}{2}x\lambda_m)], & m' \text{ 为偶数.}\end{cases}\tag{13}$$

$$\cos(Y_j\delta_n)\sum_{j'=1}^{n'}\cos(Y_{j'}\delta_n)=\begin{cases}2\cos[(\frac{b}{2}+jy)\delta_n]\cos(\frac{b}{2}\delta_n)\times\\[\sum_{j'=1}^{\frac{n'-1}{2}}\cos(j'y\delta_n)+\frac{1}{2}], & n' \text{ 为奇数,}\\2\cos[(\frac{b}{2}+\frac{2j-1}{2}y)\delta_n]\cos(\frac{b}{2}\delta_n)\times\\[\sum_{j'=1}^{\frac{n'}{2}}\cos(\frac{2j'-1}{2}y\delta_n)], & n' \text{ 为偶数.}\end{cases}\tag{14}$$

式(13)~(14)中: x 和 y 的范围分别为 $0<x\leqslant\frac{a}{m'-1},0<y\leqslant\frac{b}{n'-1}$.

鉴于 x 和 y 相互独立的特性,对式(12)中 1 个变量进行模拟,模拟所用等式为

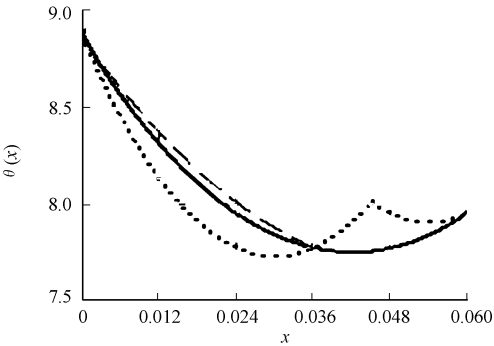
$$\theta_i(X_i)=Q[m'C_0+\sum_{m=1}^{\infty}C_m\cos(X_i\lambda_m)\sum_{i'=1}^{m'}\cos(X_{i'}\lambda_m)].\tag{15}$$

对式(15)用 Mathcad 软件进行模拟. 在模拟的过程中,根据 m' 的不同值,使用式(13)中相关的表达式. 模拟实验,选取以下参数:基板厚度(t_1)为 0.002 m;基板大小(a)为 0.18 m;基板大小(b)为 0.18 m;对流换热系数(h)为 $20\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$;基板热导率(k_1)为 $180\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$;注入功率(Q)为 1 W;芯片大小(c)为 0.002 m;芯片大小(d)为 0.002 m.

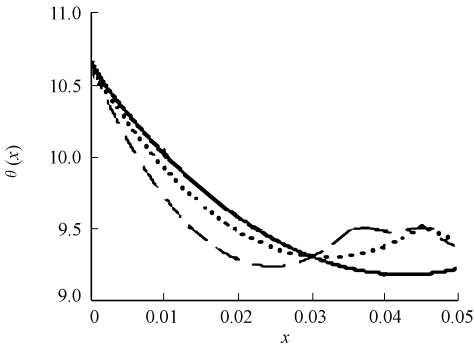
图 3 为不同 m' 值的芯片 $\theta(x)$ 的示意图. 由图 3 模拟结果可以看出:当芯片之间的间距(x)分别为 0.036 0,0.030 0,0.025 7,0.022 5,0.020 0,0.018 0 时,不同 m' 值中各芯片的 $\theta_i(X_i)$ 相同. 对于这些间距值,又可写成 $x=a/m'$. 于是,猜想对于 $m'\times n'$ 阵列的 LED 芯片,当芯片之间的间距为 $x=a/m',y=b/n'$ 时,各芯片的 CTEC 相同. 下文,通过理论来论证.

2.2 理论论证

图 4 为芯片排布确定后,芯片的坐标系. 图 4 中:芯片与芯片之间的间距为($a'=a/m',b'=b/n'$),由芯片在基板上的对称性,可知道 4 个顶点芯片质心的坐标分别为($a/2m',b/2n'$),($a-a/2m',b/2n'$),($a/2m',b-b/2n'$)和($a-a/2m',b-b/2n'$). 则第 i,j 个芯片质心的坐标为($\frac{2i-1}{2}\frac{a}{m'},\frac{2j-1}{2}\frac{b}{n'}$).



(a) $m'=5$, 一侧 3 个芯片



(b) $m'=6$, 一侧 3 个芯片

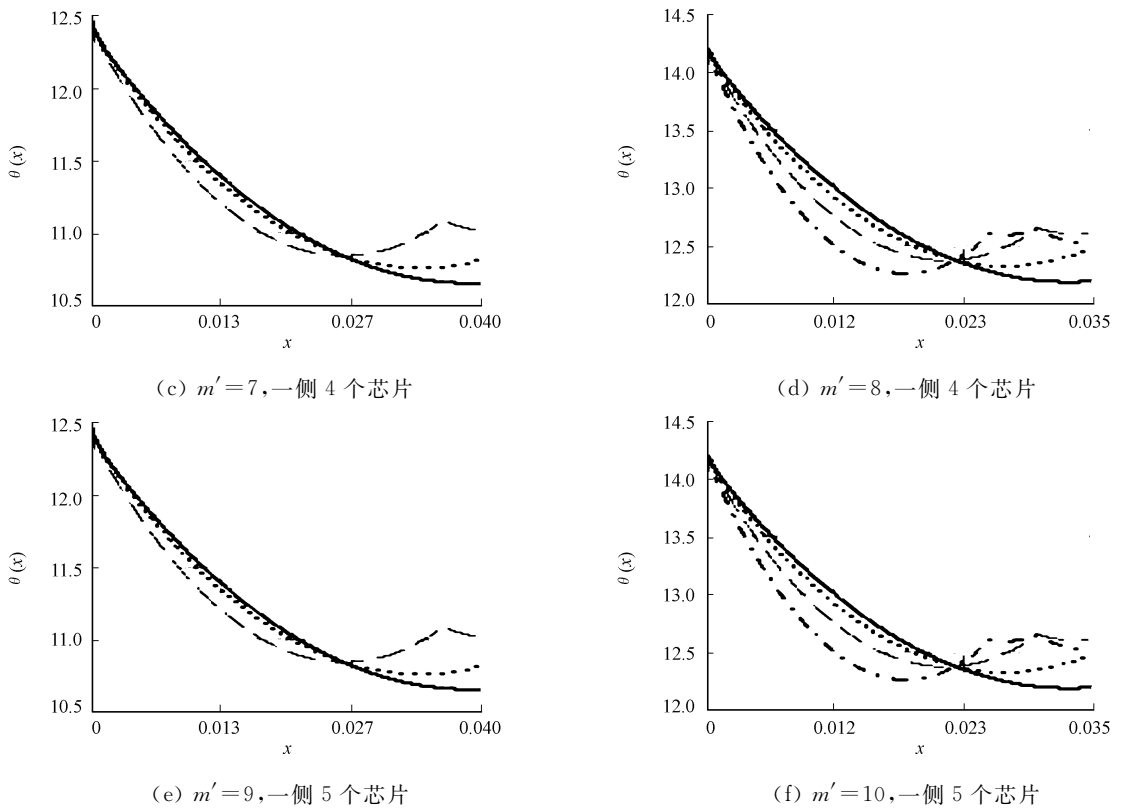


图 3 不同 m' 值的芯片 $\theta(x)$ 的示意图
Fig. 3 $\theta(x)$ schematic of the different m' value of chips

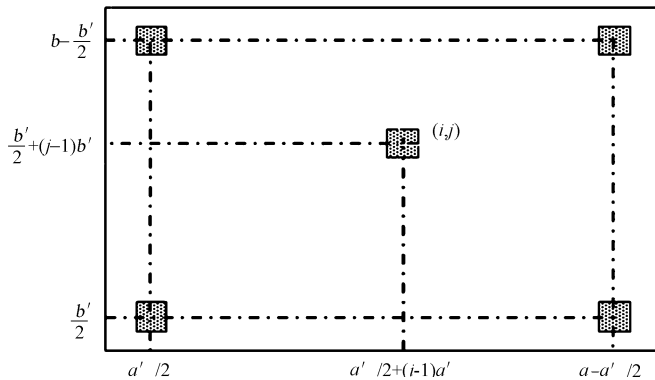


图 4 芯片的坐标系
Fig. 4 Coordinates of the chip

由式(12)得出第 i, j 个的 CTEC 表达式, 即

$$\begin{aligned} Q_{i,j}(\frac{2i-1}{2} \frac{a}{m'}, \frac{2j-1}{2} \frac{b}{n'}) = & Q\{(m' \times n')C_0 + \\ & n'[\sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos(\frac{2i-1}{2} \frac{a}{m'}, \lambda_m) \sum_{i'=1}^{m'} \cos(\frac{2i'-1}{2} \frac{a}{m'} \lambda_m)] + \\ & m'[\sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(\frac{2j-1}{2} \frac{b}{n'}, \delta_n) \sum_{j'=1}^{n'} \cos(\frac{2j'-1}{2} \frac{b}{n'} \delta_n)] + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \cos(\frac{2i-1}{2} \frac{a}{m'} \lambda_m) \times \\ & \sum_{i'=1}^{m'} \cos(\frac{2i'-1}{2} \lambda_m) \cos(\frac{2j-1}{2} \delta_n) \sum_{j'=1}^{n'} \cos(\frac{2j'-1}{2} \delta_n)\}. \end{aligned} \quad (16)$$

利用关系式 $\sum_{i=1}^n \cos(2i-1)x = \frac{\sin 2nx}{2\sin x}$. 对式(16)进行化简, 并把 $\lambda_m = m\pi/a$, $\delta_n = n\pi/b$, $C_0 = \frac{1}{ab} \times$

$(\frac{t_1}{k_1} + \frac{1}{h})$ 带入, 可得

$$Q_{i,j}(\frac{2i-1}{2} \frac{a}{m'}, \frac{2j-1}{2} \frac{b}{n'}) = Q \frac{m'n'}{ab} (\frac{t_1}{k_1} + \frac{1}{h}). \tag{17}$$

定义 1 个新的量 Q_s , 其为基板面积与芯片总功率之比 ($\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$), 或者单功率芯片所占的基板面积. 有

$$Q_s = ab / Qm'n'. \tag{18}$$

由此, 式(15)可化为

$$\theta_{i,j}(\frac{2i-1}{2} \frac{a}{m'}, \frac{2j-1}{2} \frac{b}{n'}) = (\frac{t_1}{k_1} + \frac{1}{h}) / Q_s. \tag{19}$$

从式(19)可知: $(\frac{t_1}{k_1} + \frac{1}{h}) / Q_s$ 是 1 个与芯片质心坐标无关的量, 从而猜想得证. 对于 $m' \times n'$ 阵列的 LED 芯片, 以间距 $x=a/m', y=b/n'$ 在尺寸为 $a \times b$ 的矩形基板上对称排布时, 各芯片的 CTEC 一致.

2.3 数值模拟论证与分析

用 Mathcad 软件对上述理论结果进行数值模拟论证, 并以式(11)结合式(13)或式(14)进行模拟. 模拟所用数据: 基板厚度(t_1)为 0.002 m; 对流换热系数(h)为 $20 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; 基板热导率(k_1)为 $180 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; 功率(Q)为 1 W; 芯片大小(c)为 0.002 m; 芯片大小(d)为 0.002 m. 模拟结果图, 如图 5 所示.

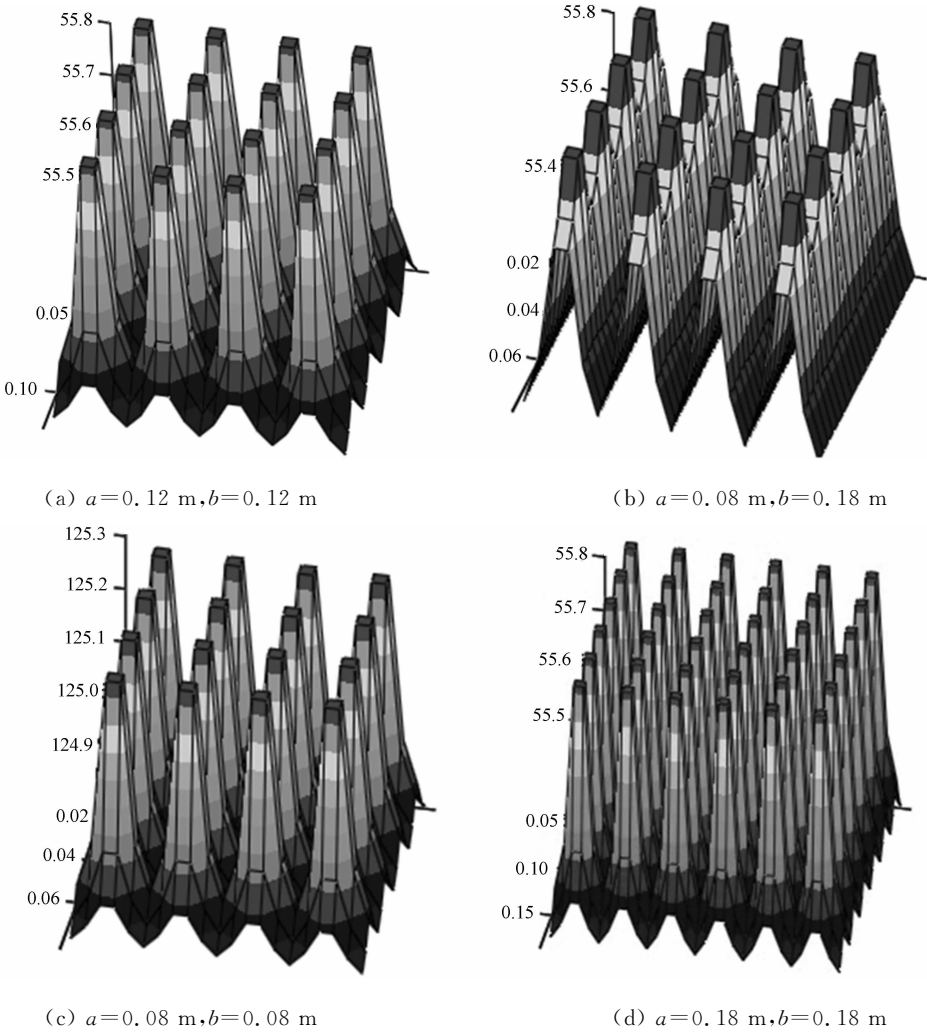


图 5 模拟结果图

Fig. 5 Simulation results chart

利用式(17)对图 5(a)~5(c)所示情况进行计算. 取芯片质心坐标为(0.015, 0.015)(图 5(a), 5(b),

5(d)所示)和(0.01,0.01)(图 5(c)所示);由计算得到的过剩温度 $\theta(0.015,0.015)=55.57\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta(0.01,0.01)=125.03\text{ }^{\circ}\text{C}$.对比可知:理论计算与数值模拟结果一致.

3 结论

通过本文研究分析可知, $m'\times n'$ 阵列 LED 芯片以芯片间距($a/m',b/n'$)在尺寸为 $a\times b$ 的矩形基板上对称排布时,各芯片的 CTEC 都相同.根据该方案的模型,获得了 CTEC 的表达式.该表达式指出:1)在基板面积相同的条件下,CTEC 的大小与基板的长宽比无关,此结果有利于基板上散热器的设计;2)CTEC 与 Q_c 成反比,因而能在一定程度上预知芯片的温度,也可根据对芯片 CTEC 不同的实际要求选择 Q_c .

参考文献:

[1] NARENDRAN N, GU Y. Life of LED-based white light sources[J]. IEEE/OSA Journal of Display Technology, 2005, 1(1): 167-171.

[2] NARENDRAN N, GU Y, FREYSSINIER J P, et al. Solid-state lighting: Failure analysis of white LEDs[J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 268(3/4): 449-456.

[3] KIM L, SHIN M W. Thermal analysis and design of high power LED packages and systems[C]// Proceedings of SPIE. San Diego: [s. n.], 2006: 681-687.

[4] CULHAM J R, YOVANOVICH M M, LEMCZYK T F. Thermal characterization of electronic packages using a three-dimensional fourier series solution[J]. Journal of Electronic Packaging, 122(3): 233-239.

[5] MUZYCHKA Y S, CULHAM J R, YOVANOVICH M M. Thermal spreading resistance of eccentric heat sources on rectangular fux channels[J]. ASME Journal of Electronic Packaging, 2003, 125(2): 178-185.

[6] MUZYCHKA Y S. Influence coefficient method for calculating discrete heat source temperature on finite convectively cooled substrates[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(3): 636-643.

[7] LUO Xiao-bing, CHENG Ting, XIONG Wei, et al. Thermal analysis of an 80 W light-emitting diode street lamp[J]. IET Optoelectronics, 2007, 1(5): 191-196.

[8] CHENG Ting, LUO Xiao-bing, HUANG Su-yi, et al. Thermal analysis and optimization of multiple LED packaging based on a general analytical solution[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(1): 196-201.

Thermal Analysis of LED Chip Array on Rectangular Substrate

ZENG Hai, GUO Zhen-ning, CHEN E-zhen, HU Zhi-wei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The heat distribution theory of the eccentric heat source in the rectangular was analyzed. Using the means of portion simulations and theoretical argument, the arrangement of $m'\times n'$ array chips with identical centroid temperature in each chip was obtained. Using this arrangement a simple equation was obtained which could solve the centroidal temperature excess of chips (CTEC). Meanwhile, 4×4 and 6×6 array chip of centroidal temperature excess were simulated. These results showed that: $m'\times n'$ array LED chip to chip spacing ($a/m', b/n'$) symmetrical arrangement on rectangular substrate of size $a\times b$, each chip has equal CTEC.

Keywords: light emitting diodel; array chips; multi-chip package; excess temperature

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)