

小功率 LED 光源封装光学结构的 Monte Carlo 模拟及实验分析

于 映 颜 峻

(福州大学电子科学与应用物理系, 福州 350002)

摘要: 采用 Monte Carlo 方法对不同光学封装结构的 LED 进行模拟, 建立了小功率 LED 的仿真模型, 应用空间二次曲面方程描述 LED 的封装结构, 对其光强分布进行模拟和统计. 通过测量实际样品, 并与模拟结果进行比较和分析, 表明计算机模拟值与实验测量值比较吻合.

关键词: LED 光源; Monte Carlo 模拟; 光学结构

EEACC: 0240G; 2560; 4250

中图分类号: TN 312⁺. 8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)12-1685-05

1 引言

随着半导体 LED 芯片材料和制备工艺的不断进步, LED 的发光效率迅速提高, 在光源方面有着很好的应用前景. 光源用 LED 除了对发光效率有要求, 对光强分布也有不同的要求, 因此需要对 LED 封装光学结构进行模拟和设计, 使光从封装界面出射之前的损失最小, 并尽可能使光分布满足应用场合的配光要求, 提高光的利用率.

通常采用几何光学方法对 LED 光源进行模拟和设计, 如利用折反聚光结构形成对光线的全反射得到折反式聚光结构的新封装结构^[1]; 利用光子晶体所具有的对光子的全反射不吸收特性进行高效率发光二极管结构的设计^[2]; 为提高 LED 光传输效率而采用非成像透镜的设计方法使 LED 的光出射后分布在一个矩形中^[3]. 而 Monte Carlo 方法则通过建立随机过程或概率模型, 对模型进行抽样实验来计算所求参数的统计特征, 具有灵活、高效的特点.

本文对小功率 LED 光源建立仿真模型, 采用 Monte Carlo 方法对不同封装光学结构的 LED 进行模拟, 应用空间二次曲面方程描述 LED 的封装结构, 对其进行光强分布的模拟和统计, 并通过测量实际样品与模拟结果进行比较和分析.

2 Monte Carlo 模拟的计算机实现

对于小功率 LED 而言, 可将发光芯片等效为点光源, 其光子分布为均匀球分布的随机数分布. 通过追踪每个随机产生的光子从芯片出发后与各封装界面的作用(反射、全反射、折射、吸收等), 以及与封装材料的作用(如内俘获损耗等), 对出射的光子数进行统计, 形成 LED 的光强分布.

2.1 LED 封装光学结构的 MC 模型及其数学表示

小功率 LED 管的发光芯片置于支架上的反光碗中央, 整个支架封装在透明的环氧树脂材料中, 该结构形成了几个主要的界面: (1) 半导体发光芯片与环氧树脂材料形成的界面; (2) 反光碗与环氧树脂形成的界面; (3) 空气与环氧树脂材料形成的界面, 光线将在该界面发生反射、折射或全反射等现象, 光子的运动方向在这里将发生较大的改变.

LED 封装光学结构模型由芯片(光源)、反光碗、封装环氧树脂与空气界面组成, 芯片由球空间均匀分布随机数向量发生器模拟, 反光碗、封装环氧树脂与空气界面则可以由通用的二次曲面方程取不同的参数和不同边界条件来获得.

空间二次曲面方程的通用数学表述为:

$$F(x, y, z) = a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{13}zx + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44}$$

采用矩阵形式可表述为:

$$F(x, y, z) = [x, y, z, 1]A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中 A 为系数矩阵, 由 A 惟一确定了空间二次曲面的形式, 不同的系数矩阵 A 代表了不同的空间二次曲面.

2.2 LED 封装光学结构模型的计算机求解

2.2.1 光子与封装表面的作用

(1) 光子的行进直线方程

已知光子的起始位置 (x', y', z') , 通过三个随机数组成的方向向量 (l, m, n) 可确定光子的飞行方向, 则光子行进的直线方程为:

$$\frac{x - x'}{l} = \frac{y - y'}{m} = \frac{z - z'}{n} = t \quad (1)$$

构成方向向量的三个随机数为 $[-1, 1]$ 间的实数, 负号表示反方向.

(2) 光子与封装表面碰撞位置的计算

根据交点求解方法和判断方法可以求得某个光子整个运动过程与封装界面作用的各个交点. 从光子的初始位置 (x', y', z') , 其方向向量为 $r_1(l_1, m_1, n_1)$, 可以计算得到由芯片发出的光子与封装界面作用的第一个位置坐标 (x_1, y_1, z_1) . 然后光子以 (x_1, y_1, z_1) 为新的出发点, 即 $(x', y', z') = (x_1, y_1, z_1)$, 以反射向量为新的方向向量 $r_2(l_2, m_2, n_2)$, 计算得到第二个作用点 (x_2, y_2, z_2) , 依此类推可以计算得到所有的交点. 光子与封装光学结构中的某一二次曲面的碰撞位置 (x, y, z) 由下式计算:

$$\begin{cases} x = lt + x' \\ y = mt + y' \\ z = nt + z' \end{cases} \quad (2)$$

其中 参数 t 由直线方程 (1) 和某界面的二次曲面方程 $F(x, y, z) = 0$ 构成的方程组确定, 即

$$\begin{cases} F(x, y, z) = a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{13}zx + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0 \\ \frac{x - x'}{l} = \frac{y - y'}{m} = \frac{z - z'}{n} = t \end{cases} \quad (3)$$

(3) 光子与封装表面作用有效性的判断

对于任一光子, 某一时刻其与 LED 封装结构的合法交点必然只有一个, 若出现以上任一交点非法情况, 则必须转向计算此光子与同一曲面的其他交点或者其他曲面的可能交点, 再重复判断直至交点合法.

2.2.2 光子在封装界面上的反射与折射

已知光子的入射矢量(方向向量 (l, m, n)), 要求解光子在某表面上的反射角和折射角大小, 必须先求出曲面在入射点的法线矢量. 由曲面方程 $F(x, y, z) = 0$ 在交点 (x, y, z) 处的法线方向向量和入射方向向量, 再根据光的镜面反射定律便可求出反射方向向量. 光子在封装材料界面上发生反射时, 根据菲涅耳公式可求出光子的反射几率 R_F :

$$R_F = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (4)$$

其中 θ_1 为入射角; θ_2 为折射角. 不同的入射角其光子的反射几率 R_F 是不同的, 故折射几率 $R_P (R_P = 1 - R_F)$ 也是变化的. 对于随机产生的任一光子在此处可能反射也可能折射, 但光子在此处的反射几率这一随机变量的概率密度函数却必须是固定的. 因此需要有一个能生成遵循菲涅耳定律所决定的概率分布形式的随机数的发生器, 使随机数在某点的取值(0 或 1)中 1 的取值概率等于该点的 R_F 值.

2.2.3 光子的内俘获

光子在 LED 封装结构中传播, 其行进过程中必然与封装材料发生作用以及与封装界面发生碰撞. 因此光子行进一定路程后将被消耗, 如材料的光子吸收、材料中杂质形成的光陷阱、界面反射或折射时的光反射和折射等等, 但从结果上考虑都可以归结为光子经过一定路程的传播或者与界面作用若干次之后转化为其他形式的能量而消失.

2.2.4 光子数目的统计

对于所追踪的光子, 若其能够从封装结构中出射, 则由其出射坐标和出射方向向量, 可精确地计算出它落在观察屏上的精确位置. 其坐标点为:

$$\begin{cases} x = l \times \frac{U - z_0}{n} + x_0 \\ y = m \times \frac{U - z_0}{n} + y_0 \\ z = z_0 \end{cases}$$

其中 (l, m, n) 为光子的出射方向向量; (x_0, y_0, z_0) 为光子的出射点坐标; U 为坐标原点与观察屏间的

距离.

对于 LED 的光强分布形式, 一般采用直角坐标或极坐标形式的配光分布曲线表达. 对模拟的结果统计按其空间角度的分布, 得到单位立体角内的光子数目, 并可根据下式求出该立体角度内的平均光强值:

$$\bar{I}_D = \frac{N_d \Phi}{\Omega} \quad (5)$$

式中 N_d 为某一立体角度内所收集到的光子数; Φ 为每一光子所代表的光通量值; Ω 为对应的立体角.

把以光源的光中心为圆心的立体空间按一定的立体角划分为立体角元 $\Delta\Omega$, 则按照上述方法可以统计每一立体角元内的光子数目, 计算出该立体角度的光强平均值, 作为此立体角内某一光线方向上的光强值, 则可以统计得到光源在所有辐出角内的光强分布.

3 LED 封装光学结构的模拟结果与实验的比较和讨论

3.1 样管光强分布的测量

本文采用 GLD-99 型光强测试仪, 对不同的 LED 管进行测试. 光分布以 1° 为单位, 测量其光强分布曲线; 测试时采用恒定 20mA 的驱动电流; 所测的数据绘制成直角坐标形式的配光分布曲线.

3.2 模拟结果与实测配光曲线的比较与分析

图 1~3 为实测配光曲线与模拟配光曲线的比较图, 其中图 1(a) 为实测配光曲线, 图中的多条曲线为相同类型的多只 LED 管的测试结果; 图 1(b) 为模拟配光曲线, 图中纵坐标 N 为经过光轴的某一平面上单位角度内的光子数, 横坐标为光子所在的角度. 模拟图中坐标从 $91^\circ \sim 181^\circ$, 91° 相当于实测图中的 0° , 而 181° 相当于 90° . 模拟图中主峰和次峰上都附带有一些小峰, 是因为实际测量的探头有一定面积, 相当于在一定面积内积分, 而模拟则相当于探头很小的情况. 在模拟中对超过 181° 的光子不能打到观察屏上故无法收集, 所以模拟图中 181° 处下降陡峭, 实际上该处一般下降很缓慢.

3.2.1 圆顶大反光碗 LED

图 1(a) 和 (b) 分别代表直径为 8.7mm、圆顶、 90° 大反光碗、支架插入深度为 2.85mm 的 LED 的实测配光曲线和模拟配光曲线. 从图中可见, 配光分

布图有两个主要的峰: 中心主峰和稍远处的次峰. 主峰较宽, 较高, 次峰较弱. 支架浅插入情况下, 模拟所得中间主峰与外环次峰的强度之比在 10^2 数量级; 而实测的这一比值在 10^2 附近. 模拟的主峰宽度(在斜率的绝对值小于 1 的范围内) 为 10° , 实测主峰宽度为 15° , 误差为 30%; 模拟次峰的峰值位置为 58° , 实测次峰的峰值位置为 58° , 误差为 0.

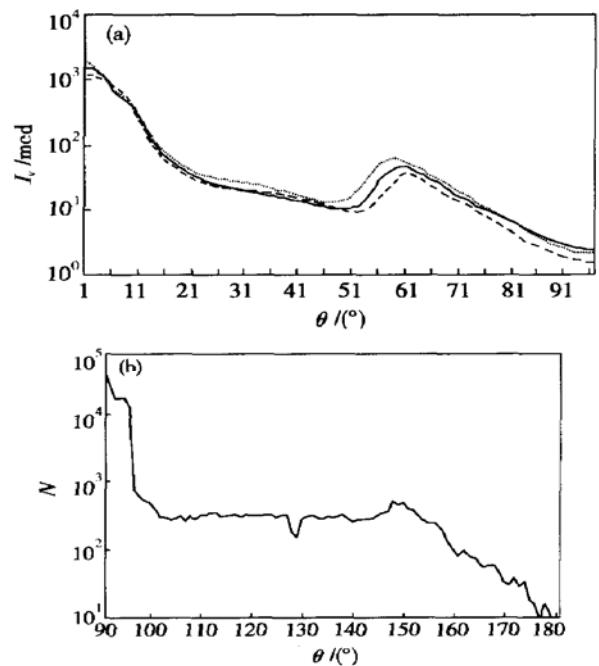


图 1 5# 管型实测和模拟配光曲线分布 (a) 实测配光曲线; (b) 模拟配光曲线

Fig. 1 Curves of light density distribution of No. 5 LED (a) Light density distribution of LED measured by GLD-99; (b) Light density distribution of LED in simulation

3.2.2 平顶大反光碗 LED

图 2(a) 和 (b) 分别代表直径为 5.3mm、平顶、 90° 大反光碗、支架插入深度为 4.07mm 的 LED 的配光曲线测试图与模拟曲线图. 由于平顶管子没有圆顶的聚光作用, 因此其中心处的光照度将大大下降, 而由于圆柱侧壁的折射产生的聚光作用, 将使其光分布呈现中心暗圆斑被亮光环包围, 然后渐远渐暗的光分布形式. 由图 2(a) 和 (b) 的对比可见, 模拟中峰值点在 37° 左右; 实测峰值点在 37° 处, 中心处的光照度与峰值的比, 模拟约为 3:5, 实测约为 7:10. 两个平碗的模拟结果与实测情况比较接近.

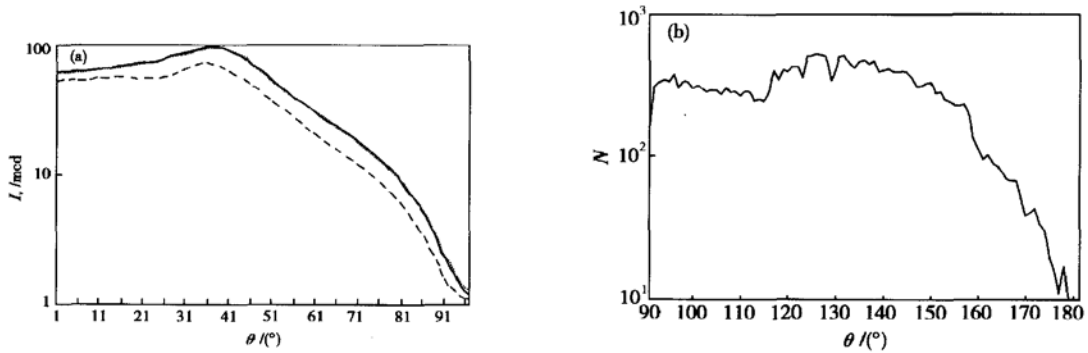


图2 13# 管型实测和模拟配光曲线分布 (a) 实测配光曲线; (b) 模拟配光曲线

Fig. 2 Curves of light density distribution of No. 13 LED (a) Light density distribution of LED measured by GLD-99; (b) Light density distribution of LED in simulation

3.2.3 平顶平碗深插入 LED

图3(a)和(b)分别代表直径为5.3mm、平顶、平碗、支架插入深度为4.18mm时的LED的实测配光曲线和模拟配光曲线。由图可见,配光分布图中心是凹圆坑,圆坑外有一个峰,峰外光强越来越弱,并且中心一定角度内光强较弱,到一定角度出现光强极值。模拟图中峰值点在 41° 左右,实测峰值点在 41° 或更大角度处;中心处的光照度与峰值的比,模拟图为10:27,实测为10:41。

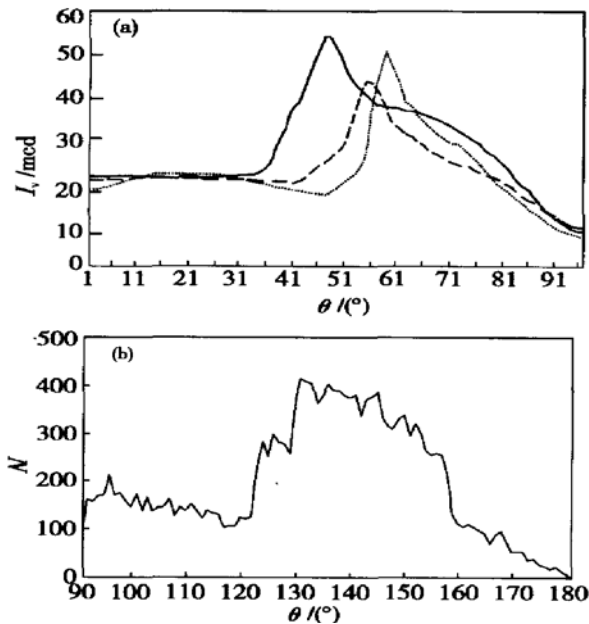


图3 14# 管型实测和模拟配光曲线分布 (a) 实测配光曲线; (b) 模拟配光曲线

Fig. 3 Curves of light density distribution of No. 14 LED (a) Light density distribution of LED measured by GLD-99; (b) Light density distribution of LED in simulation

4 结论

通过对小功率LED进行Monte Carlo模拟仿真输出光强分布曲线,并与实际测试值进行比较,表明在一定的误差范围内模拟和实际测试结果是基本相符的。模拟和实验数据的误差来源可能是由于模拟时使用的支架高度或顶面的曲面弧度与实际管子的真实高度和真实曲面弧度存在一些差异所致。在模拟的过程中发现LED结构参数变化时,模拟曲线的变化趋势与实测情况能够较好地吻合。因此该模拟仿真方法可用于光源的LED的封装光学结构进行模拟仿真、测试分析、改进,并成为LED光源配光分布求解和设计的有效方法。

参考文献

- [1] An Liansheng, Zhu Quidong. High efficiency condensing device of new type catadioptric LED. *Optical Technique*, 1999, 7(4): 29(in Chinese)[安连生,朱秋东.新型折反式LED高效率聚光器件.光学技术,1999,7(4):29]
- [2] Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhu Jun, et al. A high efficiency photonic crystal light-emitting diode. *Chinese Journal Luminescence*, 2002, 23(5): 473(in Chinese)[欧阳征标,李景镇,朱骏,等.一种高效率光子晶体发光二极管.发光学报,2002,23(5):473]
- [3] Bortz J C, Shatz N E, Pitou D. Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target. *Proc SPIE*, 2000, 4092(10): 130

Monte Carlo Simulation and Experimental Analysis on Optical Encapsulated Structure of Light Emitting Diode

Yu Ying and Yan Jun

(*Department of Electronic Science & Applied Physics, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: The simulation model of light-emitting light was developed. The spatial square curve function was used to express the encapsulated structures in the simulation. Several types of LED optical encapsulated structures were simulated with Monte Carlo method and tested by GLD-99 light density detector.

Key words: LED light source; Monte Carlo simulation; optical encapsulated structure

EEACC: 0240G; 2560; 4250

Article ID: 0253-4177(2004)12-1685-05