

文章编号: 1000-5013(2012)06-0630-05

荧光粉涂层对大功率 PC-LED 光提取效率的影响

张锦华, 王加贤, 朱大庆

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 运用基于拟蒙特卡洛的光线追迹方法,模拟计算采用不同曲率透镜及荧光粉层置于不同位置时大功率发光二极管(LED)器件的光通量和光辐射功率. 仿真结果表明:对于反光杯顶部采用透镜封装的 LED 的光通量输出和荧光粉转换效率、透镜曲率、荧光粉层位置、荧光粉粒径大小等因素有关;平面荧光粉涂层处于反光杯中不同位置时,光通量之差大于 50%,而光辐射功率也有明显的差别;当透镜顶部与反光杯开口的距离为反光杯开口半径的一半时,荧光粉涂层位于反光杯中间偏下约 0.2 mm 位置,可得到较大的光通量和荧光粉转换效率.

关键词: 荧光粉转换; 发光二极管; 荧光粉涂层; 光通量; 光辐射功率; 拟蒙特卡罗方法; 光线追迹

中图分类号: TN 312.805.94 **文献标志码:** A

由于 LED 本身具有的高亮度、稳定性、低功耗、寿命长^[1-2]等优点,其固态照明得到广泛关注,提高 LED 的光提取率和改善 LED 散热问题一直是人们努力的方向. 照明用白光可用蓝光 LED 光源激发黄色荧光粉实现,这种荧光粉转换 LED(phosphor-converted LED,PC-LED)也是目前应用最为广泛的一种组合方式. 一般的 PC-LED 封装采用荧光粉和透明胶体的混合物填充于整个反光杯中或以一定的厚度直接涂覆于芯片表面,但这种方法会导致荧光粉层中仅有 40% 的光向外发射,60% 的光反射回芯片^[3],而芯片 50% 的吸收率^[4]会造成极大的损耗,降低了器件的封装效率. 荧光粉的几何涂覆方式对 LED 光的提取有着重要影响,进而出现了各种各样的封装方式^[5-9]. Luo 等^[6-7]用平面荧光粉层模型证明了荧光粉层远离芯片可大大提高光效率,但至今采用类似于此种平面荧光粉层远离芯片涂覆方法的大部分都把荧光粉层置顶,没有具体探讨荧光粉层置于反光杯中其他位置时的效果. 本文运用拟蒙特卡洛光线追迹方法,模拟计算采用不同曲率透镜和荧光粉层置于不同位置时器件的光通量和光辐射功率.

1 模拟计算方法

1.1 光线追迹

蒙特卡洛光线轨迹的起始点和光线的方向具有统计的随机特性. 这些起始点和方向是由随机数发生器产生的随机数序列决定的. 在此,随机数发生器类型选择 Sobol 序列. 该方法与原始的蒙特卡洛方法相似,只是用确定性的超均匀分布序列代替蒙特卡洛方法中的随机数序列,其实际速度一般会快得多,并可计算精确度^[10],被称为拟蒙特卡洛方法. Sobol 序列产生的方法^[11]有如下几个步骤.

1) 对整数 n 用二进制表示,即 $n=(\cdots b_3b_2b_1)_2$. 定义 d 次本原多项式为

$$P = x^d + a_1x^{d-1} + a_2x^{d-2} + \cdots + a_{d-1}x + 1, \quad a_k \in \{0,1\}.$$

通过 a_k 和递归式

$$m_i = 2a_1m_{i-1} \oplus 2^2a_2m_{i-2} \oplus \cdots \oplus 2^{d-1}a_{d-1}m_{i-(d-1)} \oplus 2^dm_{i-d} \oplus m_{i-d},$$

可得到 $m_i, i>d$,而当 $i<d$ 时, m_i 需初始化,如 $m_i<2^i$ 且为奇数. 其中: \oplus 为位异或运算符.

2) 定义方向数 $v_i=m_i/2^i$,则 Sobol 序列的第 n 个元素为: $x(n)=b_1v_1\oplus b_2v_2\oplus\cdots$. 通过 Gray 码方法

可修正为: $x(n+1) = x(n) \oplus v_c$. 其中: c 为二进制表示的 n 的最右边的 0 位.

光线起始点和方向确定后, 每束光线根据光源特性均以一定能量穿过系统到达各种类型的表面, 或被吸收, 或被反射, 或被散射, 同时伴随着能量的削减. 当任何一点光线的光路传送下降到一个预置的极限值之下时, 对应于那条光线的光线追迹就会终止. 在此, 反光杯和芯片表面属性设为简单反射镜, 胶体用折射率表示. 光传播至荧光粉层时能量守恒, 即

$$P_i = P_u + P_{ss} + P_c + P_n.$$

式中: P_i 为入射至荧光粉层的功率; P_u 为未被吸收功率; P_{ss} 为斯托克斯位移, 即被吸收但未转换成可见光而以热能形式释放的部分; P_c 为转换成发射光谱的功率; P_n 是无辐射能量损失, 被吸收的 P_{ss} 和 P_n 又以斯托克斯位移 P_{ss} 为主. 仿真时需确定的数据主要有平均自由程、吸收光谱、激发光谱、发射光谱和未吸收光线的强度分布. 其中: 平均自由程 (l) 用密度表示 ($l = 1/\rho\sigma$, ρ 为荧光粉密度, σ 为有效横截面积), n 越大, 平均自由程越小; 激发光谱考虑斯托克斯等能量损失; 若给定粒子密度、粒径 (默认为球状) 及折射率, 便可通过 Mie 氏理论^[12] 计算平均自由程; 未吸收光线分布也是基于 Mie 氏理论得到的.

1.2 色温调节

设透镜顶部与反光杯开口距离 h , 荧光粉涂层与芯片距离 d , 在仿真过程中, 可以通过改变荧光粉密度来调节色温, 而调节色温的依据主要由以下两点.

1) 对于固定的 h, d 较小时, 芯片出射光束与荧光粉层接触面积 σ_T 较小, 照射到涂层的蓝光光线较密集, 与荧光粉颗粒的碰撞几率较大; d 增大时, σ_T 增大, 照射到涂层的蓝光光线变得稀疏, 为了保持相同色温, 只能减小荧光粉颗粒的平均自由程, 即增大荧光粉颗粒密度. 所以, 在 h 固定情况下, 要维持色温不变, 荧光粉密度需随着 d 的增大而增大.

2) 对于固定的 d, h 越小, 透镜顶部垂直方向越容易出光. 因为朗伯光源的光强分布主要集中在中间小角度范围内, 如果不希望荧光粉层中的光线和荧光粉颗粒有太多的碰撞而致使产生太多的杂散方向的光, 就得降低荧光粉颗粒密度; 反之, h 越大, 竖直方向越不容易出光, 要使光线从各个方向输出, 就得增大荧光粉颗粒密度. 故在 d 固定的情况下, 要维持色温不变, 荧光粉密度需随着 h 的减小而减小.

1.3 器件性能

LED 器件性能主要从器件向外辐射的辐射功率和光通量两方面考虑, 其封装效率^[13] 为

$$\eta_p = P_m / P_c. \quad (1)$$

式(1)中: P_m 为取出功率; P_c 为芯片出射功率, 仿真时设为固定值. 荧光粉转换效率为

$$\eta_{PCE} = \eta_a \eta_p. \quad (2)$$

式(2)中: η_a 为荧光粉量子效率, 仿真时默认为某个固定值, 也可不考虑. 所以器件取出功率 P_m 越大, 荧光粉转换效率和器件封装效率就越高, 转换成的热量也就越小.

荧光粉转换效率的高低直接影响着 LED 的散热特性, 但不同波长的光在人眼中产生的光谱光视效率也不同, 如相同能量的绿光和红光, 前者在人眼中引起的视觉强度要比后者大得多. 所以, 分析时除了要考虑荧光粉转换效率外, 还应着重与视见函数有关的光通量输出.

1.4 仿真实验

采用基于拟蒙特卡洛光线追迹方法, 对图 1 所示的荧光粉层和透镜封装方式的白光 LED 的光通量和光辐射功率进行分析仿真. 图 1 中: 芯片表面反光杯壁倾角为 45° , 高度为 2 mm; 底面直径 3 mm, 顶部开口直径 $2D=7$ mm, 表面反射率为 90%, 吸收率为 10%; 蓝光芯片尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$, 发射功率 1 W, 服从朗伯分布, 且辐射空间角度限定为 140° , 反光杯表面反吸收率为 50%. 荧光粉层为 YAG:Ce 和胶体 (硅胶或环氧树脂) 的混合物, 透镜形状为球形, 胶体和透镜的折射率取 1.5, 且透镜与杯中胶体胶合. 荧光粉层中未被吸收的光线分布基于米氏散射理论, 由此荧光粉颗粒设为球状, 其平均粒径取 0.015 mm ^[14], 荧光粉层厚度为 0.1 mm, 密度可变以调节色温. 计算时输入

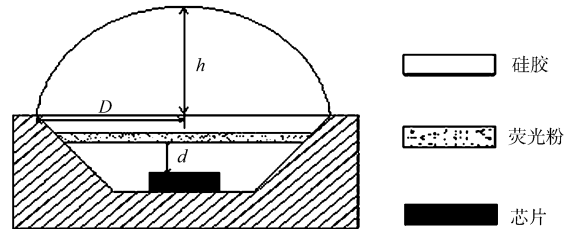


图 1 平面荧光粉层封装结构的截面图

Fig. 1 Schematic cross-sectional view of flat phosphor package

1 W, 服从朗伯分布, 且辐射空间角度限定为 140° , 反光杯表面反吸收率为 50%. 荧光粉层为 YAG:Ce 和胶体 (硅胶或环氧树脂) 的混合物, 透镜形状为球形, 胶体和透镜的折射率取 1.5, 且透镜与杯中胶体胶合. 荧光粉层中未被吸收的光线分布基于米氏散射理论, 由此荧光粉颗粒设为球状, 其平均粒径取 0.015 mm ^[14], 荧光粉层厚度为 0.1 mm, 密度可变以调节色温. 计算时输入

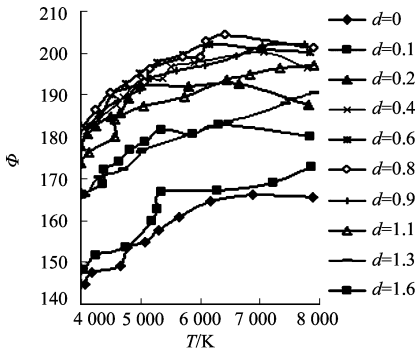
荧光粉的吸收光谱、激发光谱和发射光谱,以及芯片发射的蓝光光谱.光线追迹中,光线数目足够多,误差估计峰值控制在 5% 以下.

2 仿真结果与分析

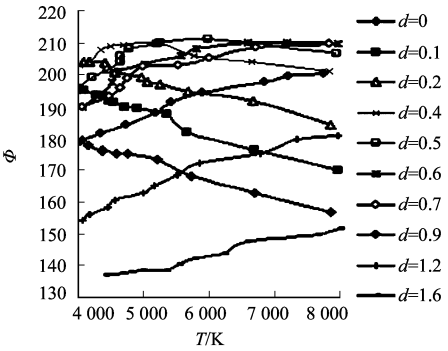
2.1 光通量

改变球形透镜顶部与反光杯开口处距离 h 、荧光粉涂层与芯片距离 d ,得到不同 h 和 d 时光通量(Φ)与色温(T)的关系,如图 2 所示.由图 2 可以得到以下 3 点结论.

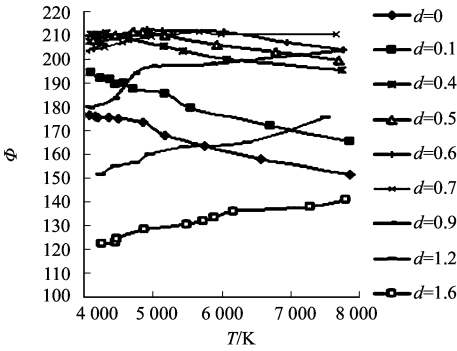
1) 在选取的 5 种 h 值情况下,当芯片表面直接涂覆荧光粉($d=0$)时,不管色温多少,辐射的光通量都比较低.虽然荧光粉折射率比胶体折射率大,使得芯片表面直接涂覆荧光粉



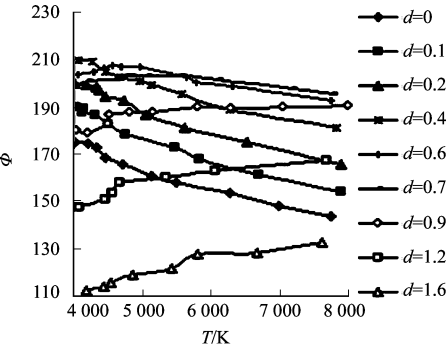
(a) $h=1D$



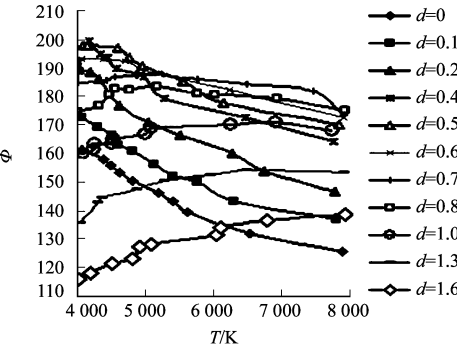
(b) $h=0.6D$



(c) $h=0.5D$



(d) $h=0.3D$



(e) $h=0.2D$

图 2 光通量与色温的关系

Fig. 2 Relationship between the luminous flux and the color temperature

($d=0$)比涂覆胶体($d>0$)有更多的蓝光进入荧光粉层,但散射回来的蓝光和黄光大部分直接返回芯片,增加了芯片的吸收损耗; $d>0$ 时,尽管进入荧光粉层的蓝光减少,但由于荧光粉层和芯片之间填充了折射率小于荧光粉层的胶体,使得从荧光粉层向芯片返回的蓝光和黄光都减少,尤其是经荧光粉转换的黄光,其光谱附近光视效率比蓝光部分大得多,所以总光通量也就会有相应的提升.

2) 荧光粉层远离芯片(d 较大)时辐射的光通量也比较低,并且随着 h 的变小,光通量随色温的增大而减小的趋势越来越明显.这种现象解释如下:相同色温下, d 较大时,荧光粉颗粒密度较大,蓝光和黄光与荧光粉颗粒的碰撞几率都较大,阻碍了光线的出射,增加了光线迂回传输的概率,同时荧光粉层以下的杯壁表面积增大,使得陷阱光线增多,增加了光的反射损耗,从而使辐射光通量较低. h 和 d 都较小时,荧光粉密度很小,荧光粉颗粒与蓝光的碰撞较少,不利于蓝光的吸收和黄光的产生,为了提高色温即提高蓝光出射,需进一步降低荧光粉密度,此时更不利于转换成黄光,导致光通量进一步降低,所以随着 h 的减小,光通量随色温的增大而减小的趋势越来越明显.

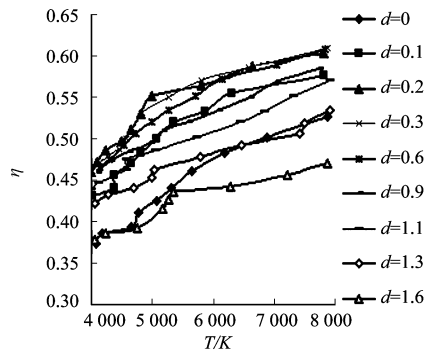
3) 在 $d=0.6\text{ mm}$ 附近,光通量总体都比较大.在这种情况下, h 较大时,荧光粉密度较大,碰撞几率高,不容易出光; h 较小时,荧光粉颗粒密度较低,导致蓝光在荧光粉层中被吸收不够,产生的黄光很少,

光通量减小, 所以存在一个最佳的 h 值.

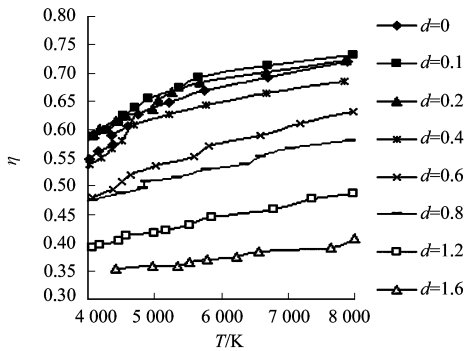
2.2 辐射功率

光通量与辐射功率有关, 但考虑到视觉函数后, 光通量并不与辐射功率成正比. 为减小器件的热效应, 应尽可能在提高光通量的情况下提高器件的辐射光功率. 改变 h, d 得到不同色温时光辐射功率(η)仿真结果, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 为了获得较大的光辐射功率, 荧光粉层应位于杯的底部附近; h 较小时, d 在 $0 \sim 0.4$ mm 内, 光辐射功率随 d 的变化较小.

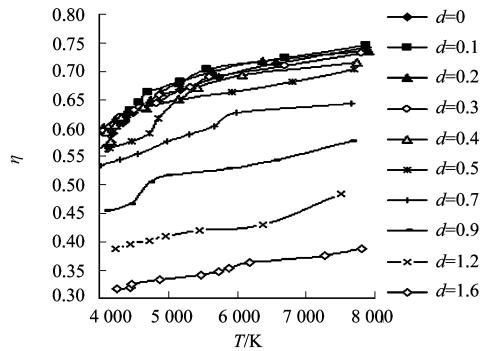
当荧光粉层直接位于芯片表面($d=0$)时, 虽反射回芯片的蓝光较多, 但由于荧光粉层折射率比胶体的折射率大, 提取



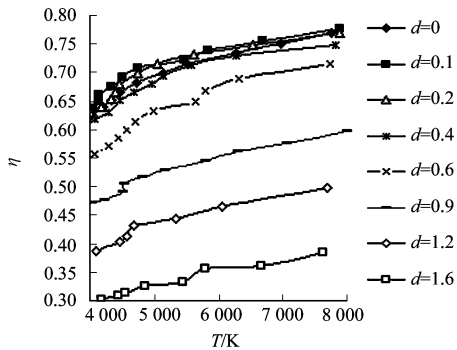
(a) $h=1D$



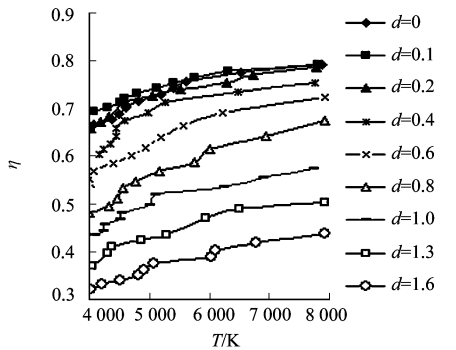
(b) $h=0.6D$



(c) $h=0.5D$



(d) $h=0.3D$



(e) $h=0.2D$

图 3 光辐射功率与色温的关系

Fig. 3 Relationship between the radiation power and the color temperature

的蓝光也较多, 所以出射的辐射功率还是比较大. 在 h 一定且 $d > 0$ 时, 荧光粉颗粒密度随着 d 的增大而增大. 当 d 较大时, 荧光粉密度变得过大而阻碍蓝光和黄光, 尤其是蓝光的输出, 导致光辐射功率减小; 当 $d=0.1$ mm 时, 总的光辐射功率随着 h 的减小一直增大, 即 h 越小, 荧光粉颗粒密度越小, 蓝光越容易出射, 致使光辐射功率峰值越来越大.

3 结论

从光通量与色温关系的仿真结果分析可知: 在 $h=0.5D, d=0.6$ mm 时, 即荧光粉层置于反光杯中

部附近位置(芯片厚度与 d 的和为 0.9 mm 左右), 辐射的光通量较大. 从光通量、光辐射功率与色温关系的结果可知: 在 $h=0.5D$, 荧光粉层位置应取杯的中间附近; 总体光通量较大. h 越小(即透镜曲率越小)和 d 越小, 光辐射功率越大, 所以从光辐射功率角度考虑, 荧光粉层在杯中间并不是最佳位置. 由于荧光粉层在杯中间和芯片表面之间变化时对光辐射功率的变化影响并不是很大, 所以可综合考虑取值, 如 $h=0.5D$, 荧光粉层高度位于杯中间偏下 200 mm 可得到较大的光通量和封装效率或荧光粉转换效率.

PC-LED 的光通量输出和荧光粉转换效率与透镜曲率、荧光粉几何形状及位置、荧光粉粒径大小等因素有关. 从这些方面考虑,通过改变荧光粉浓度及涂覆位置、透镜曲率等参数进行模拟计算和分析对比,可以得到一种较好的封装方式,从而获得较大的光通量和辐射功率输出.

参考文献:

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

[2] SCHIBERT E F. Light-emitting diodes[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2003: 1-132.

[3] ZHU Yi-ting, NARENDRAN N, GU Yi-ming. Investigation of the optical properties of YAG : Ce phosphor[C]// Sixth International Conference on Solid State Lighting, San Diego: SPIE, 2006: 63370(S1-S8).

[4] KIM J K, GESSMANN T, LUO Hong, et al. GaInN light-emitting diodes with RuO₂/SiO₂/Ag omni-directional reflector[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(22): 4508-4510.

[5] NARENDRAN N, GU Yi-ming, FREYSSINIER-NOVA J P, et al. Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency[J]. Physica Status Solidi (A): Applied Research, 2005, 202(6): R60-R62.

[6] LUO Hong, KIM J K, SCHUBERT E F, et al. Analysis of high-power packages for phosphor-based white-light-emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(24): 243505(1-3).

[7] KIM J K, LUO Hong, SCHUBERT E F, et al. Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup[J]. Jpn J Appl Phys, 2005, 44(21): 649-651.

[8] ALLEN S C, STECKL A J. ELIXIR: Solid-state luminaire with enhanced light extraction by internal reflection[J]. Disp Technol, 2007, 3(2): 155-159.

[9] ALLEN S C, STECKL A J. A nearly ideal phosphor-converted white light-emitted diode[J]. Appl Phys, 2008, 92(14): 143309. 1-143309. 3.

[10] 鲁珊珊, 唐贵, 卞红琴, 等. 拟蒙特卡罗积分与蒙特卡罗积分[J]. 温州大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 14-19.

[11] BRANDIMARTE P. Numerical methods in finance and economics[M]. John Wiley & Sons, 2006: 281-287.

[12] VAN DE HULST H C. Light scattering by small particles[M]. New York: Dover Publications, 1981: 114-161.

[13] LIU Zong-yuan, LIU Sheng, WANG Kai, et al. Optical analysis of phosphor's location for high-power light-emitting diodes[J]. IEEE, 2009, 9(1): 65-73.

[14] TRAN N T, YOU J P, SHI F G. Effect of phosphor particle size on luminous efficacy of phosphor-converted white LED[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(22): 5145-5150.

Effect of Phosphor Coating Layer on the Extraction Efficiency
of the High-Power PC-LED

ZHANG Jin-hua, WANG Jia-xian, ZHU Da-qing

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

Abstract: The paper introduced quasi Monte Carlo ray tracing method to get the luminous flux and radiation power of the high-power light-emitting diode (LED) using different curvature lens and phosphor layer in different position of the cup. The simulation result shows that, for the packaging devices using lens on top of the reflector cup, the curvature of the lens, phosphor layer's position, and particle size all plays an important role in luminous flux extracting and phosphor conversion efficiency. When flat phosphor layer in different position of the reflector cup, the difference of luminous flux can get to over 50%, and the radiation power also has an obvious difference. When the distance between the top of the lens and reflector cup is half of the radius of the cup opening, it can obtain a better luminous flux output and phosphor conversion efficiency with the position of the phosphor layer being around 0.2 mm below the middle of the cup.

Keywords: phosphor conversion; light emitting diode; phosphor coating layer; luminous flux; radiation power; quasi Monte Carlo methods; ray trace