

doi: 10.3788/gzxb20124109.1081

基于光学薄膜的 LED 光谱调制技术

郝宏刚¹, 王文梁², 罗元¹, 阮巍¹

(1 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

(2 南昌大学 理学院, 南昌 330031)

摘要:针对白光 LED 光谱与自然光谱的不同, 讨论了采用光学薄膜改善白光 LED 光谱的可行性, 同时提出了一种利用光学薄膜消除白光 LED 发光光谱中蓝光成份的方法, 设计了光学薄膜的透过率曲线, 并分析了其可行性. 针对单色 LED 光谱随温度不同发生变化的特点, 根据分析样品在 4.9°、24°和 49°三种环境温度下的光谱分布, 设计了一种光学薄膜的透过率曲线, 分析利用该设计薄膜改善单色 LED 光谱温度稳定性的可行性及结果. 研究表明, 在保证白光 LED 出光效率的前提下, 仅靠在发光芯片上镀制光学薄膜的方式并不能改善光谱的结构, 而使之与自然光中的可见光谱相似. 采用设计的光学薄膜, 可以消除白光 LED 发光光谱中的蓝光波段, 提高光谱的舒适性. 在 4.9°、24°和 49°三种环境温度下, 利用设计的薄膜可将分析 LED 的发光光谱的中心波长稳定在 700 nm 附近, 相对发光强度稳定在 0.2 附近, 不同温度时光谱分布的相似性也有了较大的改善, 研究结果有助于 LED 照明光源的进一步应用.

关键词:白光 LED; 单色 LED; 光谱; 光学薄膜; 温度

中图分类号: TN312.8; O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)09-1081-5

0 引言

LED 是一种直接注入电流的发光器件, 可直接把电能转化为光能. 随着高效、大功率 LED 技术的不断突破, LED 已经成为一种理想的固体照明光源. 新型 LED 照明光源相对白炽灯等传统光源具有功耗小、寿命长、体积小、重量轻、工作电压低、发光响应时间短、光色纯等一系列特性, 已广泛应用于指示灯、显示屏、交通信号灯、隧道照明、景观照明和路灯照明等诸多领域.

随着 LED 产业的扩大, LED 光源的电光性能以及温度、电流等对其发光性能的影响逐渐受到人们的关注. 作为光源, LED 将被应用于不同温度环境, 因此温度对 LED 光电特性的影响显得至关重要. 随着温度的升高, LED 的光谱曲线发生变化, 波长发生漂移, 辐射通量减少^[1-4]. 另外, 按照 CIE 显色指数计算法, 光源的显色指数值与光谱分布密切相关, 越接近自然光谱(或者说是标准光谱), 显色指数越高. 但是利用显色指数评价 LED 显色性时, 有时却不能正确的反映 LED 灯具的显色性. 在光辐射波段中, 紫外线及蓝光波段对人体的危害尤为明显, 特别是对婴儿和儿童, 同样 LED 所发光的光谱不

全, 必然会引起人眼的视觉缺陷, 使人眼观察感觉到不适. 因此, LED 光源的光谱稳定性及分布应引起人们的关注.

现代光学薄膜已广泛应用于各种光学器件, 成为各种光学部件及系统中不可或缺的一部分. 光学薄膜的应用对光源不仅可以起到保护作用, 还可以调节光源的光谱特性. 近年来应用于 LED 的光学薄膜, 包括透明导电薄膜和全方位反射薄膜, 主要用于减少透明电极层透光率低和衬底反射率低的问题, 提高 LED 出光效率^[5]. 本文主要在分析白光 LED 光谱与可见光光谱区别的基础上, 对利用光学薄膜改善 LED 光谱特性和去除光谱中的蓝光波段的可行性做出积极探讨. 另外, 设计出光学薄膜的透过率曲线, 分析了利用光学薄膜改善单色 LED 光谱温度稳定性的可行性.

1 利用光学薄膜改善白光 LED 光谱的可行性

1.1 利用光学薄膜消除白光 LED 光谱与可见光光谱分布差异的可行性

人工照明光源都是用一般显色指数作为显色性的评价指标, 显色指数同时也是衡量光源颜色特性

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60907041)和重庆市科技攻关计划项目(No. CSTC2009AC4187)资助

第一作者: 郝宏刚(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学测试. Email: haohg@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2012-02-24; 修回日期: 2012-04-19

的重要参量. 针对传统光源显色指数的计算已有多种测试方法并建立了相关标准, 但利用显色指数评价 LED 显色性时却存在一些问题. 现用于照明的 LED 器件, 几乎完全使用了黄色荧光粉加蓝光的模式来产生白光, 其显色性虽然比传统路灯使用的高压钠灯高很多, 但是低于白炽灯. 而这种方式在产生低色温的白光时, 其颜色已经严重偏离了黑体辐射曲线, 令人们难以适应. 因此如何产生高显色性的白光, 尤其是低色温下高品质的白光成为 LED 进入普通照明的关键点.

LED 芯片发出蓝光, 光的一部分入射到黄色荧光粉上激发出另一种黄色的光, 这两种光混合产生白光, 其典型的光谱结构如图 1 实线. 图 1 中虚线为太阳光中可见光部分的光谱曲线^[6]. 可以看出, 采用上述方式的白光 LED 得到的白光与自然光中的可见光光谱存在较大的差别, 白光 LED 的白光在 470~565 nm 波段功率缺失严重, 而在 440~470 nm 波段光谱功率较大, 这些差别将会影响白光 LED 光源的显色性. 在保证白光 LED 出光效率的前提下, 仅靠在发光芯片上镀制光学薄膜的方式并不能改善光谱的结构, 而使之与自然光中的可见光谱相似. 目前, 改变荧光粉的成份和涂覆比例、方式, 以及通过其他三基色 LED 芯片或多种单色 LED 芯片的发光混合得到光谱结构更完善的白光光谱是人们研究的热点^[7-9].

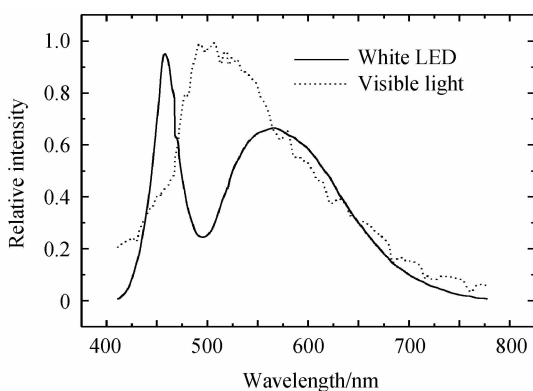


图 1 可见光光谱与白光 LED 光谱

Fig. 1 Visible light spectrum and white light LED spectrum

1.2 利用光学薄膜消除白光 LED 光谱中蓝光波段的可行性

白光 LED 的光谱中有不同比例的紫外及蓝光波段, 特别是由蓝色发光芯片激发黄色荧光粉获得的白光光谱. 由图 1 可以看出利用该方式获得的光谱中 440~470 nm 的偏蓝波段光谱功率较高, 然而, 光谱中的蓝光部分会对视网膜色素层产生损伤, 因此, 可以考虑采用在发光芯片上镀制光学薄膜的方式去除光谱中的蓝光波段, 改善白光 LED 的光谱

结构. 根据图 1 所示白光 LED 光谱和可见光光谱的区别, 研究分析后设计了具有如图 2 所示透过率的光学薄膜, 将其镀制在发光芯片上面后, 白色 LED 出射白光光谱如图 3 实线. 由图 3 可以看出, 利用设计光学薄膜的白光 LED 光谱中 440~470 nm 的偏蓝波段光谱功率将为与可见光光谱中的相对光功率相同, 可降低该波段对人眼的损害, 进一步改善白光 LED 光源发光光谱, 提高人眼在该光源下工作的舒适性. 但是, 由于该方法的运用, 使 LED 光源的出光效率明显降低.

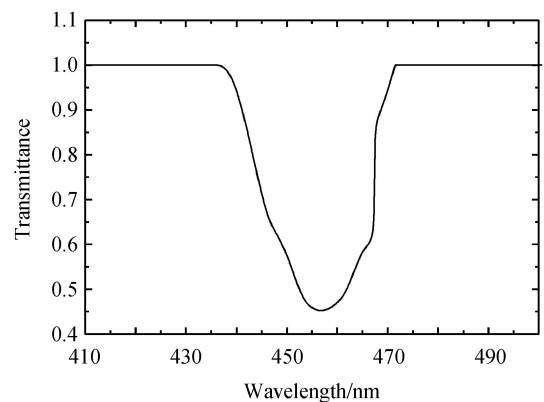


图 2 设计光学薄膜的透过率曲线

Fig. 2 The calculation result of transmittance of the optical coating

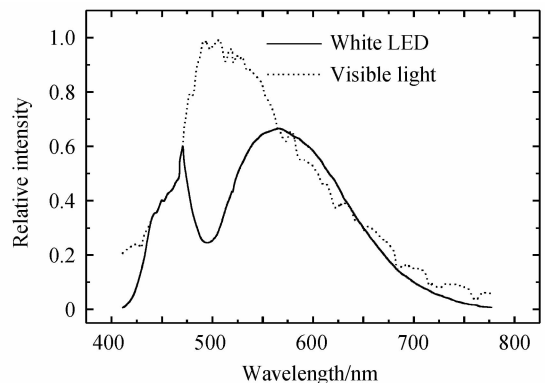


图 3 消除蓝光波段的白光 LED 光谱与可见光光谱

Fig. 3 The white light LED spectrum and visible light spectrum after eliminate blue band

2 利用光学薄膜改善单色 LED 温度稳定性的可行性

2.1 利用光学薄膜改善中心波长强度稳定性的可行性

LED 输入功率中大约 80% 至 85% 的能量通过热传导方式散发出去, 而不能像白炽灯一样的辐射散热. LED 的稳定性便很容易受自身散热及环境温度影响. 实验已经证实, 随环境温度升高 LED 发光中心波长会受到影响, 除蓝光 LED 的波长随环境温度的升高而向短波方向漂移外, 其他则向长波方向

漂移,同时发光强度降低^[10].如图 4 所示,针对分析的 LED 样品,在环境温度为 4.5°时,中心波长为 686.4 nm,相对发光强度为 1;当环境温度变为 24°和 49°时,中心波长分别变为 690 nm 和 695 nm,相对发光强度变为 0.76 和 0.45.当 LED 在不同环境温度下使用时,由于中心波长和发光强度的变化,会影响 LED 的发光颜色.除了从荧光粉和发光芯片方面寻求解决方法外,1994 年, Yukio Tanaka 提出了一种利用在发光芯片上镀制光学薄膜改善单色 LED 发光光谱温度稳定性的方法^[10]. Yukio Tanaka 针对分析 LED(如图 4)光谱温度稳定性,设计了具有(如图 5)透过率曲线的光学薄膜,有效地改善了 LED 发光光谱的温度稳定性.当环境温度为 4.9°、24°和 49°时,改善后的 LED 的发光光谱如图 6.由图 6 可以看出,在三个使用温度下,对应的 LED 发光中心波长和相对发光强度分别为 690 nm、694 nm、698 nm 和 0.43、0.39、0.31.与图 4 对比可知,采用设计的光学薄膜可以改善 LED 在不同环境温度下使用时的光谱漂移现象,但同时也对 LED 的出光效率产生了较大的影响.在对颜色要求苛刻且使用环境温度有波动的应用领域,可以采用光学薄膜的方法改善 LED 发光光谱的温度稳定性.

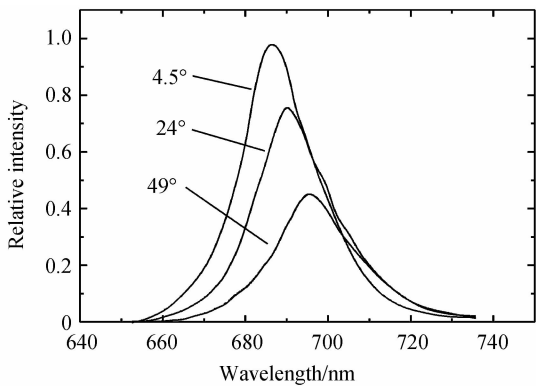


图 4 不同环境温度时的单色 LED 光谱
Fig. 4 Monochromatic LED spectra at different ambient temperatures

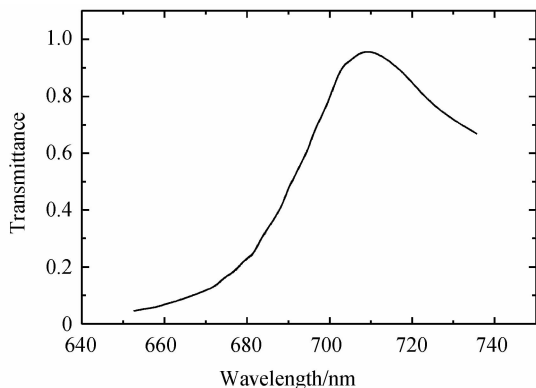


图 5 设计光学薄膜的透过率曲线
Fig. 5 The calculation result of transmittance of the optical coating

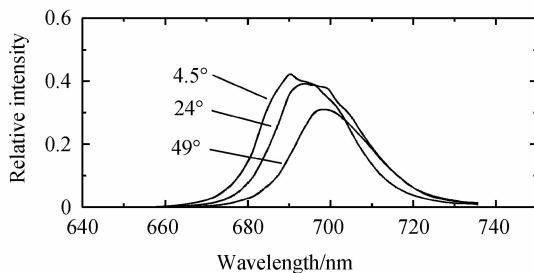


图 6 利用光学薄膜后的 LED 光谱
Fig. 6 LED spectrum after use optical coating

2.2 利用光学薄膜改善光谱分布温度稳定性的可行性

另外,由图 6 可以看出,采用设计的光学薄膜使三种环境温度下的 LED 发光中心波长上的相对强度基本保持稳定,但实际发光的中心波长和光谱分布并不一致.由于光学薄膜技术的发展,目前不仅可以准确镀制出具有(如图 5)较为光滑的透射率曲线的光学薄膜,还可以设计并制作出具有任意形状透射率曲线的光学薄膜.根据图 4 中 LED 在三个环境温度下的光谱分布,为了使 LED 在三种环境温度下保持相同的光谱分布,进一步改善 LED 的光谱稳定性,经优化分析后得到了如图 7 所示的透射率曲线;通过设计并镀制在发光芯片上后,研究的 LED 在三种环境温度下的发光光谱如图 8.由图 8 可以看出,在 4.9°、24°和 49°三种环境温度下,LED 发光光谱的中心波长基本稳定在 700 nm 附近,同时,相对发光强度稳定在 0.2 附近,光谱分布的相似性与图 6 相比也有了较大的改进.因此,具有图 8 所示的透过

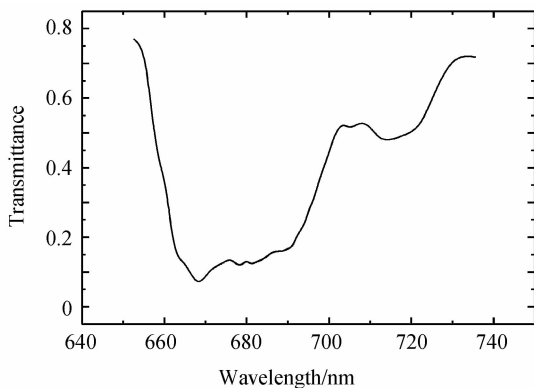


图 7 设计光学薄膜的透射率曲线
Fig. 7 The calculation result of transmittance of the optical coating

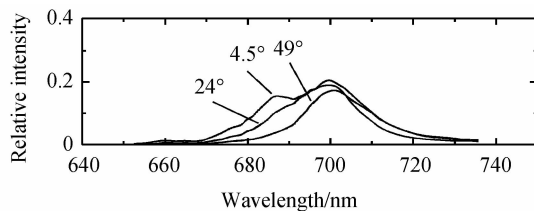


图 8 利用光学薄膜后的 LED 光谱
Fig. 8 LED spectrum after use optical coating

率曲线的光学薄膜不仅可以改善所用 LED 发光中心波长的温度稳定性,还可以提高 LED 光谱分布的温度稳定性。

由上面的分析可知,采用光学薄膜的方法可以改善单色 LED 光谱的温度稳定性,同时也可以看出,该方法的运用降低了 LED 发光效率,因此,该方法只能用对光谱要求较高且对发光功率要求不高的场合。另外,当环境温度连续变化或在其他使用温度点时,应重新设计光学薄膜的透过率曲线,以满足不同使用温度下对 LED 光谱调制的需求。当然,本文中光学薄膜透射率的设计是理想的设计结果,实际运用光学薄膜调制 LED 光谱时,光学薄膜的设计应该考虑 LED 发光的角度、封装结构、光学薄膜材料、镀膜方式的选择以及与 LED 光源结构的配合设计等问题,光学薄膜的设计过程较为复杂。

3 结论

本文针对单色 LED 光谱和白光 LED 的光谱的问题,分析了单色 LED 光谱的温度稳定性问题,介绍了白光 LED 的光谱与可见光光谱的不同,重点研究了利用设计的光学薄膜改善单色 LED 光谱温度稳定性和消除白光 LED 发光光谱中蓝光成份的问题。研究表明,利用光学薄膜可以较好地改善 LED 光源光谱,所提出的方法可以应用于对光谱要求较高的领域,研究结果有助于对 LED 照明光源的进一步广泛应用。本文仅提出了利用光学薄膜对 LED 光谱进行调制的方法,并没有对一些细节问题进行探讨,本课题组今后将重点实验研究光学薄膜材料、结构、优化薄膜设计以及与 LED 光源的配合设计等问题,为该方法的进一步应用提供实验支撑。

参考文献

- [1] DING Tian-ping, GUO Wei-ling, CUI Bi-feng, *et al.* The effect of temperature on the spectra of high power LED[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(6): 1450-1453.
丁天平,郭伟玲,崔碧峰,等. 温度对功率 LED 光谱特性的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(6): 1450-1453.
- [2] CHEN Chao, XIA Ming-fei, YANG Hong-ru, *et al.* Dependence of InGaN-based white LEDs spectral characteristics on junction temperature [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(5): 1032-1036.
陈超,夏明飞,杨鸿儒,等. InGaN 基白光 LED 光谱特征和结温相关性研究[J]. *应用光学*, 2011, **32**(5): 1032-1036.
- [3] LIU Li-ming, ZHENG Xiao-dong. Measurements of LEDs spectral characteristics and junction temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1069-1073.
刘立明,郑晓东. LED 结温与光谱特性关系的测量[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1069-1073.
- [4] TIAN Chuan-jun, ZHANG Xi-yan, ZOU Jun, *et al.* Temperature effect on the photoelectric parameter of high-power LED illumination system [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(1): 96-100.
田传军,张希艳,邹军,等. 温度对大功率 LED 照明系统光电参量的影响[J]. *发光学报*, 2010, **31**(1): 96-100.
- [5] WANG Le, WU Bi-qing, LI Xiao-yan, *et al.* Progress in effects of optical thin-film on light extraction efficiency of LED [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2011, **29**(4): 647-654.
王乐,吴弼卿,李晓艳,等. 光学薄膜对 LED 出光效率影响的研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2011, **29**(4): 647-654.
- [6] FAN Duo, BAI Su-ping, YAN Yu-feng, *et al.* The theory research of solar spectrum simulated by LED[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, **34**(3): 16-18.
范铎,白素平,闫钰锋,等. LED 模拟太阳光谱的理论研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2011, **34**(3): 16-18.
- [7] WANG Zhi-jun, LU Wei, LI Pan-lai, *et al.* Spectral characteristics of LiSrBO₃:Sm³⁺ phosphor for white LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 913-917.
王志军,陆伟,李盼来,等. 白光 LED 用 LiSrBO₃:Sm³⁺ 材料的光谱特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 913-917.
- [8] HUA Wei, XIANG Wei-dong, DONG Yong-jun, *et al.* Spectra characteristics of new developed Ce, Pr doped YAG phosphor for white-LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 907-911.
华伟,向卫东,董永军,等. 白光 LED 用新型 Ce, Pr 掺杂的 YAG 单晶荧光材料的光谱性能研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 907-911.
- [9] LIAO Jin-sheng, YOU Hang-ying, WEN He-rui, *et al.* Synthesis and luminescence properties of La₂(WO₄)₃:Eu³⁺ red phosphors as LED application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 658-662.
廖金生,游航英,温和瑞,等. LED 用 La₂(WO₄)₃:Eu³⁺ 红色荧光粉合成及光谱性能[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 658-662.
- [10] TANAKA Y, TOYAMA T, TOHMON R. A novel temperature-stable light-emitting diode [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1994, **41**(7): 1125-1127.

LED Spectrum Modulation Technique Based on Optical Coating

HAO Hong-gang¹, WANG Wen-liang², LUO Yuan¹, RUAN Wei¹

(1 *College of Electronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*)

(2 *Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

Abstract: According to the differences between the white LED spectrum and the visible light spectrum, the feasibility of using optical coating to improve the spectrum is discussed. Meanwhile, a novel method is proposed to eliminate blue band of the white LED spectrum. The transmittance of the required optical coating is calculated, and the feasibility of method is analyzed. According to the spectrum of the single LED is different at the different temperatures, the transmittance of the required optical coating is calculated based on the spectrum of the single LED at the temperature 4. 9°, 24°, 49°, and the feasibility of using optical coating to improve the temperature stability of the single LED spectrum is analyzed. The results show that the method of using optical film coated on the LED chip does not improve the structure of the white LED to make it similar with the visible light spectrum. The blue band of the white LED spectrum can be eliminated and improve the comfort of the spectrum using the designed optical thin film. The center wavelength and the relative luminous of the analyzed single LED can be stabilized at the 700 nm and 0.2 at the temperature 4. 9°, 24°, 49° using the designed optical film. The similarity of the spectrum at the different temperature is improved greatly. The results contribute to the further application of LEDs.

Key words: White LED; Single LED; Spectrum; Optical coating; Temperature